POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale in Ingegneria civile

Tesi di laurea magistrale

Stima della riduzione del consumo domestico di acqua potabile a Torino mediante il recupero di acque piovane

Relatori:
Prof.ssa Ilaria Butera
Prof. Roberto Revelli

Candidato:
Matteo Carollo

Dicembre 2020

Indice

Sommario 4
Abstract 5
Introduzione 6
1 Il sistema di raccolta dell'acqua piovana 8
1.1 Domanda e offerta d'acqua 8
1.2 Influenza del bacino 10
1.3 Funzionamento del sistema di raccolta 12
1.4 Capacità ottimale del serbatoio 13
1.4.1 Significato di NPWS e FURE 15
1.4.2 Criterio di scelta del serbatoio 19
1.5 Scala cittadina 19
2 Metodo di calcolo del risparmio idrico 21
2.1 Funzionamento del serbatoio di un edificio 21
2.1.1 Volume prelevato 23
2.1.2 Volume finale 24
2.1.3 Ciclo iterativo 26
2.2 NPWS di zona 28
2.3 Risparmio idrico 29
3 Applicazione del metodo alla città di Torino 30
3.1 Edifici 31
3.1.1 Dati a disposizione: il Censimento ISTAT 32
3.1.2 Determinazione degli edifici rappresentativi 34
3.1.3 Assegnazione degli edifici alle aree sub comunali 41
3.2 Domanda d'acqua non potabile pro capite 53
3.3 Altezza di pioggia 54
3.4 Parametri $\boldsymbol{\phi}$, $\boldsymbol{ff}$ ed $\boldsymbol{a}$ 55
4 Simulazione pluriennale principale 57
4.1 Risultati per ogni area sub comunale 58
4.2 Andamento di NPWS e FURE per i diversi edifici 70
4.3 Mappa del risparmio idrico: NPWS di zona 74
4.4 Risparmio idrico assoluto 75
4.5 Sintesi dei risultati 77
4.5.1 Riepilogo dei risultati 78
4.5.2 Leggi empiriche 80
5 Analisi di sensitività 84

5.1 Valori diversi per la domanda d'acqua 84
5.2 Domanda d'acqua variabile nella settimana 86
5.3 Parametro a : area di Mirafiori Sud 87
6 Simulazione annuale: area di Mirafiori Sud 89
7 Stima del risparmio e dei costi 95
Conclusioni 101
Bibliografia 104

Sommario

Le abitazioni dei Paesi sviluppati sono collegate all'acquedotto, che trasporta l'acqua potabile dal punto di captazione fino ai centri abitati e dentro le case. L'uso che se ne fa all'interno dell'abitazione o nelle sue pertinenze non giustifica sempre l'esigenza di avere un'acqua di qualità tale da poter essere bevuta: se lo deve essere per lavarsi e cucinare, non serve invece che lo sia per lo sciacquone del w.c. o per innaffiare l'orto.
L'acqua piovana che viene raccolta dalle superfici impermeabili delle case (tetti, terrazze) è spesso di una qualità sufficiente per gli usi di cui si è scritto ed ogni casa ha il proprio bacino di raccolta: il suo tetto. Per poter usare l'acqua piovana per questi fini non-potabili l'abitazione ha bisogno di un impianto separato rispetto a quello dell'acqua potabile e di una capacità, ossia un serbatoio che possa gestire la differenza tra la portata di afflusso della pioggia e la domanda d'acqua degli abitanti. L'insieme degli elementi che mettono in atto la raccolta, l'accumulo e il trasporto dell'acqua piovana costituisce il *Sistema di raccolta* o *Rainwater Harvesting System* (abbreviato come *sistema RWH*).
L'obiettivo di questa tesi è quantificare la riduzione del consumo di acqua potabile nella città di Torino, conseguente all'utilizzo della pioggia raccolta in ogni edificio residenziale: in primo luogo la tesi mira a stimare il risparmio idrico complessivo nelle diverse zone in cui la città verrà suddivisa e il risparmio idrico individuale dell'abitante; in secondo luogo l'indagine è volta a ottenere uno strumento predittivo, che permetta di stabilire quale capacità debba avere il serbatoio dell'RWH per ottenere il maggior risparmio idrico e che consenta inoltre di conoscere l'entità di tale risparmio. Per raggiungere questi scopi viene costruito un modello matematico che simula il funzionamento del serbatoio, dati l'andamento temporale della pioggia, le caratteristiche del bacino degli edifici residenziali e la domanda idrica degli abitanti.

Abstract

Houses in developed countries are connected to the aqueduct, which carries drinking water from the collection point to built-up areas and into houses. The water that is used inside the house or in its appurtenances does not always need to be of high quality: the water must be of good quality for personal hygiene, for drinking and cooking, but it does not need to be either for flushing the toilet or for watering the garden.
The rainwater that is collected from the waterproof surfaces of houses (roofs, terraces) is often of a sufficient quality for the uses mentioned above and each house has its own collection basin, its roof. In order to use rainwater for these non-potable purposes the house needs a separate system from that of drinking water and a capacity, made up of a tank that can manage the difference between the flow rate rain and the inhabitants' demand for water. The set of elements that implement the collection, accumulation and transport of rainwater constitutes the *Rainwater Harvesting System* (*RWH system*).
The object of this thesis is to quantify the reduction in the consumption of drinking water by the inhabitants of the city of Turin, resulting from the collection of rain in each residential building and its use within the same building. First, the thesis aims to estimate the overall water saving of the different areas into which the city will be divided and the individual water saving of the inhabitant. Secondly, the survey is aimed at finding a predictive tool that allows you to determine what capacity the RWH tank should have to achieve the greatest water savings and that also allows you to know the extent of this saving.
To achieve these purposes, a mathematical model is built that simulates the operation of the reservoir, given the temporal trend of the rain, the characteristics of the basin of residential buildings and the water demand of the inhabitants.

Introduzione

A cominciare dalla metà dell'Ottocento, in Italia, in Europa e nell'Occidente in genere, vennero costruite le prime reti di distribuzione di acqua corrente di buona qualità che raggiungevano capillarmente l'interno delle case delle città e permettevano quindi di cucinare e dissetarsi in sicurezza; nel contempo iniziarono a diffondersi nelle abitazioni o sui loro balconi i water-closet, ossia le latrine munite di sciacquone con riserva d'acqua (la cui struttura attuale risale al 1886 [1]), che proprio grazie all'apporto di acqua consentivano di allontanare efficacemente le feci dalle abitazioni attraverso le fogne, invece di accumularle nei pozzi neri: queste migliorie tecnologiche portarono a un miglioramento delle condizioni igienico-sanitarie delle persone e quindi a una minore diffusione di varie malattie. Con il tempo l'acqua corrente e i servizi igienici si diffusero anche nelle case al di fuori delle grandi città e negli anni '60-'70 del secolo successivo sono stati raggiunti in Italia gli attuali livelli di diffusione: oggi praticamente ogni casa è dotata dei servizi igienici. A partire dal Secondo dopoguerra, con il miglioramento delle condizioni economiche di una larga fetta della popolazione, iniziarono a diffondersi nelle abitazioni anche molti elettrodomestici, tra i quali la lavabiancheria, che soppiantò la pratica del lavaggio degli abiti nei lavatoi o nei ruscelli; questa macchina, come gli altri apparecchi idraulici presenti nell'appartamento viene collegata all'impianto domestico dell'acqua potabile. Infatti, per comodità e per il fatto che l'acqua potabile ha un basso costo, gli edifici sono stati generalmente dotati di un unico impianto di acqua corrente, senza differenziarne la qualità in funzione degli scopi: bisogna tuttavia tenere presente, come stabilisce il Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 99/1997 che solo la cucina e gli apparecchi sanitari del bagno devono essere riforniti di acqua potabile, mentre lo sciacquone del w.c., la lavabiancheria e l'acqua per il lavaggio dei pavimenti o l'innaffiamento delle piante non richiedono acqua potabile.
Partendo dalla constatazione che l'acqua usata all'interno delle abitazioni per fini non potabili costituisce una buona parte della domanda d'acqua totale delle persone e che la popolazione mondiale col tempo aumenta, si è fatta strada l'idea di migliorare la gestione delle acque al fine di moderare i prelievi di acqua di buona qualità dall'ambiente naturale. Tra le alternative possibili, incluso il riuso delle acque reflue chiare (scarichi dei lavandini, docce, ecc.) una pratica fonte di acqua non potabile è costituita dalle superfici impermeabili delle abitazioni: attualmente l'acqua meteorica è inviata alla fognatura, ma basterebbe introdurre un serbatoio che la possa accumulare, per poterla successivamente attingere mediante un apposito impianto idraulico e distribuirla all'interno degli appartamenti.
La qualità dell'acqua piovana raccolta dai tetti dipende dalla natura delle particelle solide e dagli inquinanti presenti nell'atmosfera, che vengono trasportati dalla pioggia o che si depositano sui tetti nei periodi secchi e che vengono dilavati durante l'evento piovoso; tuttavia la sola permanenza dell'acqua piovana all'interno del serbatoio prima dell'uso, consente la sedimentazione e la precipitazione di molte sostanze dannose e un conseguente grande miglioramento della sua qualità che, in alcuni casi, in funzione dell'inquinamento atmosferico della zona, può raggiungere un livello qualitativo simile a quello previsto dalle norme dei diversi Paesi per l'acqua potabile (Campisano et al., 2017 [2]).
Tuttavia, com'è intuibile, l'installazione di un secondo impianto idraulico domestico può avere un costo molto grande, al punto da non renderla conveniente: infatti, poiché il w.c. e la lavabiancheria si trovano all'interno delle abitazioni e le tubazioni che li servono sono generalmente immurate, si rendono necessari importanti lavori di tipo edile, oltre che idraulico, per mantenere invariata l'estetica della casa, specialmente all'interno degli alloggi.

Inoltre, a seconda dei casi, potrebbe essere necessaria l'adozione di una pompa, con conseguente spesa per il consumo di energia elettrica; infine bisogna tenere in considerazione i costi di manutenzione, un aspetto sempre presente.
È bene ricordare che la pratica dell'utilizzo di acqua piovana raccolta dalle superfici impermeabili di un ambiente urbano, anche per fini potabili, non è certo una novità, basti pensare ad esempio alla città di Venezia, nella quale in passato la popolazione raccoglieva, attraverso apposite caditoie, l'acqua piovana intercettata dalle superfici delle piazze (i "campi"), acqua che si accumulava sotto di esse in grandi vasche colme di sabbia isolate dalla falda salmastra circostante e che veniva poi prelevata manualmente attraverso un pozzo praticato in questa vasca, nel centro della piazza: l'acqua, passando attraverso la sabbia, veniva purificata e quindi poteva a quel tempo essere ritenuta idonea al consumo umano. Anche oggi, nelle zone rurali del Piemonte, come verosimilmente può accadere in molte altre zone del mondo, si può osservare di frequente la presenza di barili e cisterne collegate tramite i pluviali ai tetti delle abitazioni e alle tettoie, dentro i quali l'acqua viene raccolta per essere usata nell'innaffiamento degli orti o per il lavaggio di attrezzi; tuttavia, in Italia l'utilizzo dell'acqua piovana all'interno delle abitazioni costituisce attualmente un'eccezione. Al giorno d'oggi il recupero dell'acqua piovana per usi domestici è attuato soprattutto da Paesi poveri che hanno una buona disponibilità idrica ma pochi mezzi economici per trasportare l'acqua fino alle abitazioni (in questo caso essa è utilizzata spesso per fini potabili) oppure da Paesi ricchi ma con una disponibilità idrica molto bassa (per esempio l'Australia) o una domanda d'acqua molto grande rispetto alla disponibilità (Giappone), Paesi nei quali essa viene usata prevalentemente per usi non potabili (Campisano et al., 2017 [2]).
Un beneficio non secondario che si può ottenere accumulando l'acqua di pioggia è quello della riduzione del volume inviato alla fognatura. L'acqua piovana intercettata dai tetti verrebbe infatti normalmente condotta alle fognature; in alcuni casi i collettori per l'acqua bianca, ossia quella piovana, sono separati da quelli che raccolgono gli scarichi domestici (acqua nera); spesso però questa distinzione non esiste e ciò può provocare alcuni problemi: durante un evento piovoso la portata generata dalla pioggia intercettata dai tetti è notevolmente maggiore della portata generata dagli scarichi domestici, quindi l'acqua nera viene molto diluita, fatto che comporta una diminuzione nell'efficienza di depurazione. Inoltre la grande portata d'acqua che passa nelle fognature durante un evento piovoso può far sì che tutta la sezione del tubo si riempia: in questo caso il moto, che normalmente avviene a pelo libero, muta rapidamente per svolgersi in pressione e l'acqua può avere sufficiente energia per uscire dalle caditoie ed invadere le strade, con possibili danni dovuti ad allagamenti e contaminazioni.
Questa tesi concentra l'attenzione sulla città di Torino e mira a conoscere i benefici e i costi che si otterrebbero se tutti i suoi edifici residenziali venissero dotati di un sistema di raccolta e distribuzione dell'acqua piovana (Rainwater Harvesting System – sistema RWH).
Il primo obiettivo è stabilire per ogni edificio la giusta capienza del serbatoio e il conseguente massimo risparmio idrico ottenibile; tuttavia, per la grande quantità di edifici in gioco, non sarà possibile analizzare ogni individuo, ma si opererà in maniera statistica su un numero ridotto di edifici.
Il secondo obiettivo è quello di estrarre, dai molti risultati ottenuti, alcune relazioni chiare e semplici tra le variabili che influiscono sull'efficienza del sistema e che permettano dunque di stabilire per qualsiasi edificio quali siano la capacità ottimale e il risparmio atteso.
Infine si vogliono analizzare i principali costi e benefici generati dall'installazione diffusa a tutta la città dei sistemi di raccolta.

1 Il sistema di raccolta dell'acqua piovana

1.1 Domanda e offerta d'acqua

Per comprendere qual è il tipico andamento dei consumi di acqua potabile nel tempo è utile far riferimento ai grafici della fig. 1, che si riferiscono ai consumi della località di Venezia Terraferma: a sinistra è rappresentato l'andamento annuale della portata media giornaliera dell'anno 1995, mentre a destra è raffigurato l'andamento giornaliero della portata oraria del 27 luglio 1995, giorno in cui si è registrata la massima portata media giornaliera di quell'anno (picco del grafico di sinistra).

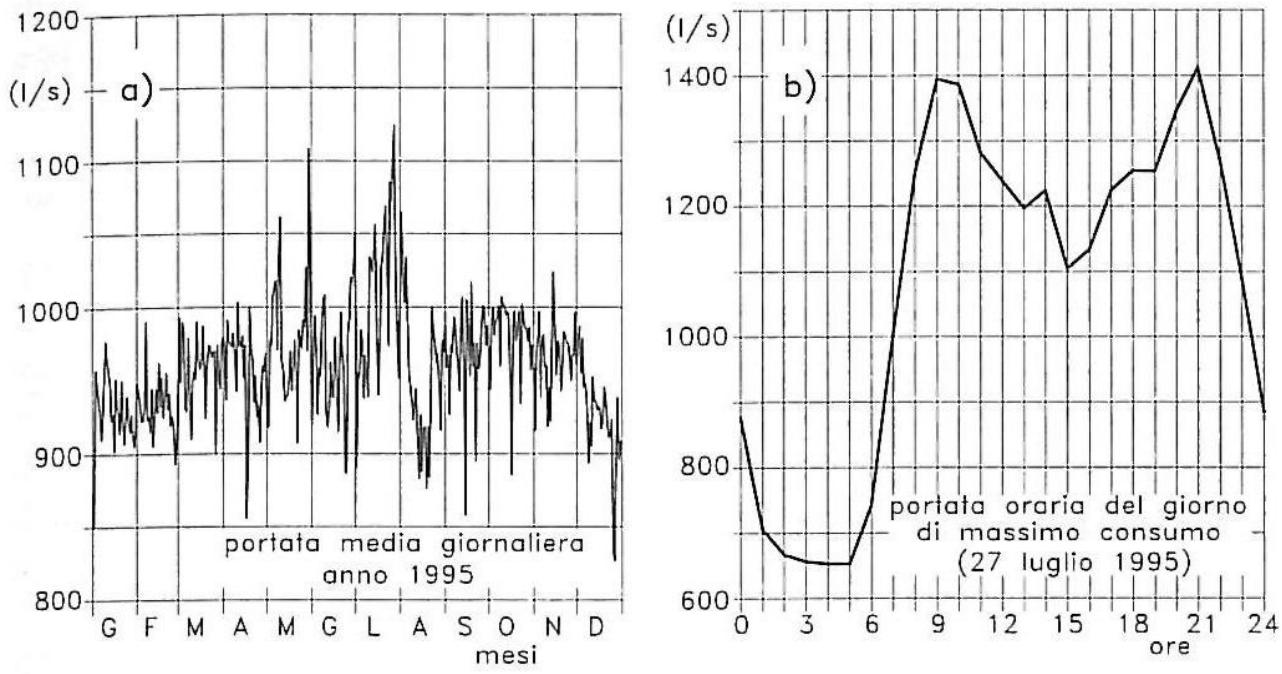


Fig. 1:*consumo annuale e giornaliero in Venezia Terraferma dell'anno 1995 (immagine tratta dal libro "Acquedotti", Da Deppo et al.* [3]*)*

È bene tenere presenti due importanti aspetti: il primo è che l'acquedotto fornisce acqua non solo alle persone residenti, ma anche agli esercizi commerciali, agli ospedali, a piccole industrie che non abbiano fonti di approvvigionamento proprie, quindi i valori del grafico non sono riconducibili soltanto al consumo degli abitanti, come suggerisce il fatto che di notte i consumi sono tutt'altro che nulli; il secondo aspetto è che c'è una differenza tra il volume d'acqua immesso nella rete e il volume realmente erogato alle persone: le perdite d'acqua valgono infatti, in Italia, mediamente il 30% del volume immesso nell'acquedotto.
Ciò che si può osservare nel grafico di fig. 1(a) è che la portata media giornaliera erogata da un acquedotto presenta molte fluttuazioni attorno ad un valore che, nel tempo, descrive una curva concava verso il basso: i consumi quindi crescono mediamente tra l'inverno e l'estate, per poi ridiscendere presentando il massimo proprio nei mesi caldi, quando la domanda d'acqua per l'igiene della persona e per l'irrigazione di orti e giardini è maggiore.

Si può anche notare come siano presenti dei giorni in cui la portata è molto bassa rispetto a quelli adiacenti, come accade nel mese di agosto: questi sono i giorni in cui buona parte della popolazione è assente a causa delle vacanze e quindi i consumi scendono. Questa situazione è ovviamente opposta nelle località turistiche, come la parte insulare della stessa città di Venezia, poiché la popolazione consumatrice aumenta.
Dalla fig. 1(b) si deduce che il consumo giornaliero è concentrato in due fasce orarie, al mattino e alla sera, con un minimo relativo nel primo pomeriggio ed il minimo assoluto di notte, quando la popolazione riposa. Ciò è dovuto al fatto che i maggiori consumi di acqua si verificano quando al mattino le persone si preparano per raggiungere il luogo di lavoro e dopo l'ora di cena, prima di tornare a coricarsi.
Un ulteriore dato utile è l'area sottesa alla curva della fig. 1(a), area che è numericamente pari al volume di acqua potabile consumato in un anno dall'intera popolazione di Venezia Terraferma (comprese le perdite e il consumo non residenziale): questo volume annuo, se viene rapportato al numero di abitanti ed al numero di giorni dell'anno, diventa la *domanda media giornaliera pro capite* su base annua, espressa in litri/giorno/abitante, anche chiamata *dotazione*. L'andamento della fig. 1(a) si ripete in modo simile di anno in anno, tuttavia la curva può traslare verso l'alto (aumento del volume annuo) o verso il basso (diminuzione del volume annuo), perciò la dotazione è un buon indicatore che consente di capire l'evolversi del consumo di acqua potabile nel tempo, di anno in anno, potendo in questo modo evidenziare gli aumenti e i decrementi. Nel caso italiano, l'evoluzione della domanda giornaliera pro capite è stata quella di una crescita durante gli anni della ricostruzione post-bellica e fino alla metà degli anni '80 del Novecento, mentre successivamente, dagli anni '90, il consumo pro capite ha cominciato a diminuire. Secondo la legge italiana, Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 4/3/1996, il volume minimo che deve essere garantito ad ogni utenza domestica potabile è pari a 150 litri/giorno/abitante.
Di tutto il volume di acqua potabile consumato, come si è scritto, una parte viene usata per scopi non potabili. I principali usi per i quali è possibile usare acqua non potabile all'interno di un'abitazione sono elencati di seguito e ad ognuno viene associato il proprio consumo, espresso come frazione della domanda d'acqua giornaliera pro capite (elaborazione su dati forniti dall'Ing. A. Rizzo, Iridra S.r.l [4]):

- sciacquone del w.c., circa 30%
- bucato, circa 12%
- pulizia della casa e altri lavaggi, circa 5%
- innaffiamento delle piante, circa 4%.

Si può subito notare come gli usi non potabili costituiscano una parte importante della domanda, secondo questi dati circa la metà: in particolare il maggior consumatore di acqua potabile è lo sciacquone del w.c., seguito dalla lavabiancheria.
Secondo un altro studio, svolto da Lúcio et al. (2019, [5]) e riguardante la città di Lisbona, il consumo giornaliero non potabile di ogni persona è pari a circa il 28% del suo consumo totale giornaliero. Degli usi elencati, solo l'irrigazione ha una variabilità sostanziale tra le stagioni dell'anno, fatto che contribuisce quindi a generare l'andamento concavo rappresentato nella fig. 1(a); gli altri usi elencati sono invece abbastanza indipendenti dal tempo. Partendo da questa constatazione, si può supporre che la variazione stagionale dei consumi non potabili sia abbastanza ridotta all'interno delle città, dove la diffusione delle aree verdi è piccola rispetto alla popolazione.
Per quanto riguarda invece l'*offerta* di acqua piovana, essa dipende principalmente da due fattori: la pioggia e l'area del bacino che la intercetta, poiché il volume giornaliero di acqua piovana intercettata dal bacino è semplicemente pari al prodotto tra l'altezza di pioggia

cumulata in un giorno (*p*), misurata con un pluviometro e l'area in pianta del bacino stesso, cosicché tra l'altezza di pioggia e il volume di acqua piovana intercettato c'è solo il fattore di scala dell'area. Gli eventi piovosi più lunghi sono solitamente concentrati nell'arco temporale massimo di qualche giorno, pertanto si capisce facilmente che la rappresentazione su un grafico dell'andamento annuale dell'altezza di pioggia giornaliera sarebbe costituita da una serie di picchi alternati a periodi secchi in cui la pioggia è assente e ciò non consentirebbe di trarne alcune informazioni generali sui periodi che sono mediamente umidi e su quelli più secchi. Per conoscere quali siano i periodi più piovosi e quelli più secchi è utile considerare l'andamento della *media mensile* dell'altezza giornaliera di pioggia (o neve fusa) misurata dalle stazioni pluviometriche: a titolo di esempio si riporta l'andamento dell'altezza giornaliera di pioggia della stazione pluviometrica di Vallere a Torino. Le medie mensili cambiano negli anni: il grafico di fig. 2 ne mostra il valore medio calcolato sugli anni che vanno dal 2002 al 2019, associato all'intervallo di variazione determinato dallo scarto quadratico medio.

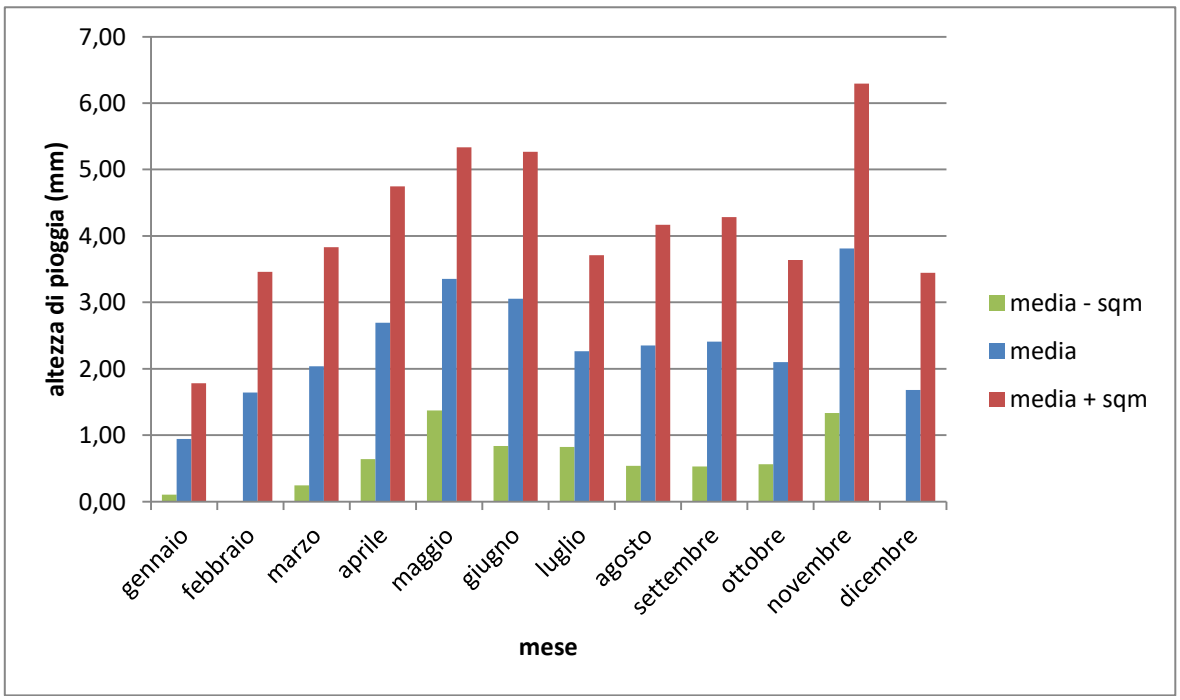


Fig. 2: *valore medio del periodo 2002-2019 dell'altezza di pioggia media mensile (in blu), a cui è associata la banda di variazione misurata dallo scarto quadratico medio (ponendo pari a zero i valori negativi)*

Il comportamento medio dell'altezza di pioggia rappresentato in fig. 2 è caratterizzato da due picchi, uno primaverile e uno autunnale, mentre nei mesi estivi la pioggia è scarsa; la minima altezza di pioggia si verifica nei mesi invernali.

1.2 Influenza del bacino

Il bacino artificiale a cui ci si riferisce in questa tesi è la sola copertura dell'edificio, ossia il suo tetto, piano o inclinato, che è praticamente impermeabile, nel senso che l'acqua non penetra all'interno dell'edificio; ciononostante la sua forma influisce sulla quantità di pioggia realmente recuperabile. Della pioggia intercettata dal bacino, infatti, solo una parte si trasforma in deflusso superficiale che viene raccolto dalle grondaie, poiché un'altra parte

viene trattenuta dal bacino stesso: ciò è dovuto principalmente alla porosità del materiale di cui è costituito il bacino e alle sue piccole depressioni, alla inclinazione del bacino e alla quantità di pioggia caduta durante l'evento considerato, in quanto una volta saturati i pori tutta la pioggia si trasforma in deflusso superficiale. Un ulteriore fattore influente è la durata del periodo secco antecedente all'evento piovoso, in quanto maggiore è tale durata, maggiore è la quantità di acqua che ha lasciato i pori e le depressioni del bacino, che quindi possono accogliere l'acqua piovana, riducendo il deflusso (Farreny et al., 2011 [6]). Per poter tenere conto facilmente di questo effetto, viene introdotto il *coefficiente di deflusso* (ϕ), pari alla frazione dell'altezza di pioggia intercettata dal tetto che si trasforma in deflusso superficiale (fig. 3). Per quanto si è scritto, il coefficiente di deflusso tende all'unità col passare del tempo, durante l'evento piovoso. Nel paragrafo 3.4 verrà ripreso questo argomento, quando verrà scelto il valore del coefficiente di deflusso da assumere nel caso della città di Torino.

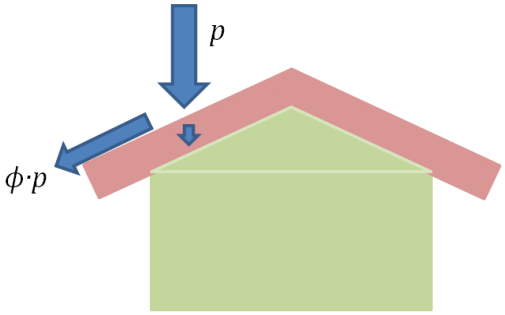


Fig. 3: *schema di funzionamento del bacino di raccolta: pioggia, accumulo nel tetto e deflusso superficiale (volumi per unità di area del bacino)*

La qualità dell'acqua piovana che diventa deflusso superficiale è fortemente condizionata dalle sostanze che provengono dall'ambiente circostante e che si depositano sul tetto, principalmente polveri, guano degli uccelli e foglie cadute dagli alberi: per trattenere gli oggetti più grandi, all'ingresso del condotto che porta l'acqua al serbatoio di accumulo è necessario installare un filtro; per quanto riguarda invece le polveri, sono state fatte delle misure da parte di alcuni ricercatori, i quali hanno stabilito che i primi millimetri di deflusso sono caratterizzati da concentrazioni molto alte di sostanze nocive per l'uomo, mentre successivamente ad essi la qualità dell'acqua piovana migliora notevolmente (Amin et al., [7], Kus et al., [8]). Questo deflusso iniziale, che è una sorta di lavaggio del tetto da ciò che vi è depositato sopra, è chiamato *acqua di prima pioggia* o *first flush* (*ff*); ai fini dell'utilizzo di acqua piovana per gli usi non potabili è conveniente scartare del tutto questo volume d'acqua molto inquinata per mezzo di un dispositivo installato a monte del serbatoio di accumulo, che lo devia verso la fognatura. L'entità del first flush dipende principalmente dall'inquinamento atmosferico dell'ambiente circostante e dalla durata del periodo in cui le polveri si possono accumulare, ossia la durata del periodo secco compreso tra due eventi piovosi consecutivi, i quali operano questo lavaggio del tetto: maggiore è la concentrazione di polveri nell'aria e maggiore è la durata del periodo secco, maggiore sarà la quantità di polveri che si accumuleranno sul tetto: da ciò consegue che maggiore sarà il deflusso da scartare per ottenere acqua di buona qualità (Amin et al., Kus et al.).

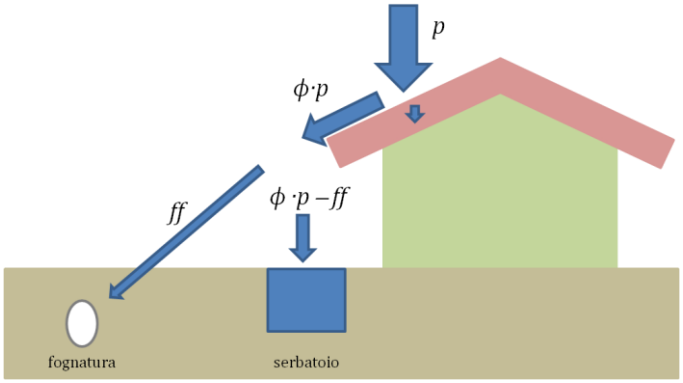


Fig. 4: *first flush inviato alla fognatura e volume raccolto nel serbatoio (volumi per unità di area del bacino)*

L'*offerta netta* di acqua piovana che può utilizzarsi al posto dell'acqua potabile è dunque pari all'altezza netta di pioggia ϕp-ff moltiplicata per l'area del bacino, mentre il volume di pioggia intercettata è l' *offerta lorda*. Nel paragrafo 3.4 verrà ripreso questo argomento, nel momento della scelta del valore di *ff* da assumere nel caso della città di Torino.

1.3 Funzionamento del sistema di raccolta

Il funzionamento del sistema di raccolta dell'acqua piovana (Rainwater Harvesting System, RWH) è dunque il seguente: la pioggia intercettata dal tetto viene raccolta dalle grondaie e convogliata, attraverso i pluviali, ad un dispositivo che la filtra e che separa la parte del first flush, deviandola verso la fognatura; la parte pulita viene raccolta in un serbatoio dal quale parte un impianto idraulico, del tutto simile a quello utilizzato per l'acqua potabile, che porta l'acqua piovana al w.c., alla lavatrice, al lavatoio e ai rubinetti interni o esterni all'abitazione che servono per l'approvvigionamento di acqua non potabile. In generale non si può parlare di una sostituzione completa nella fornitura di acqua non potabile, ma di un raddoppio dell'impianto, poiché la quantità di pioggia intercettata dal tetto è spesso insufficiente a soddisfare la richiesta dell'utente, quindi la presa d'acqua della lavatrice o dello sciacquone deve essere alimentata anche dall'acquedotto mediante un sistema che possa commutare l'alimentazione dall'impianto dell'acqua non potabile all'acquedotto.
La quota alla quale viene posto il serbatoio determina la pressione nell'impianto: se il serbatoio venisse interrato servirebbe una pompa per fornire l'energia necessaria affinché l'acqua raggiunga quote maggiori, invece se venisse posizionato nel sottotetto dell'edificio l'energia potenziale potrebbe essere già sufficiente a vincere le resistenze al moto. È evidente che dal punto di vista strutturale il vantaggio si inverte, poiché un serbatoio posizionato alla sommità di un edificio, in funzione della sua capacità, implica un carico ulteriore non previsto nel progetto originario, del quale bisogna tenere conto.
La fig. 5 mostra un tipico sistema di raccolta in cui il serbatoio è interrato ed è presente una pompa che fornisce energia all'acqua per poter raggiungere una cisterna posta nel sottotetto, che ha lo scopo principale di mantenere costante la pressione nell'impianto; tale cisterna è alimentata anche dall'acquedotto, in modo da sopperire alla mancanza di acqua non potabile di origine piovana quando le precipitazioni sono scarse o quando la domanda dell'utenza è grande.
Si è già accennato al fatto che l'acqua piovana spesso non riesce sempre a soddisfare completamente le esigenze non potabili degli abitanti dell'edificio. Questo dipende sia dalla domanda d'acqua dell'edificio (funzione del numero di abitanti) che dall'offerta, ossia dal

connubio tra la quantità di pioggia e l'area del bacino: a parità di precipitazione, più grande è l'area del tetto rispetto al numero di abitanti, più facile sarà fornire acqua piovana sufficiente a sostituire (o ridurre notevolmente) l'acqua potabile per gli usi non potabili.
La disponibilità di acqua piovana per gli usi di cui si è scritto dipende però anche da un altro fattore: la capacità del serbatoio. Essa consente alle portate in ingresso (pioggia raccolta dal tetto) e in uscita (domanda degli abitanti) di essere diverse, ossia accumula acqua durante gli eventi piovosi creando una riserva per i giorni più secchi; tuttavia, se il serbatoio è poco capiente una parte dell'acqua piovana raccolta non può essere accumulata, quindi tracima e viene allontanata tramite la fognatura (fig. 5, overflow): quest'acqua non può quindi essere usata dagli abitanti.

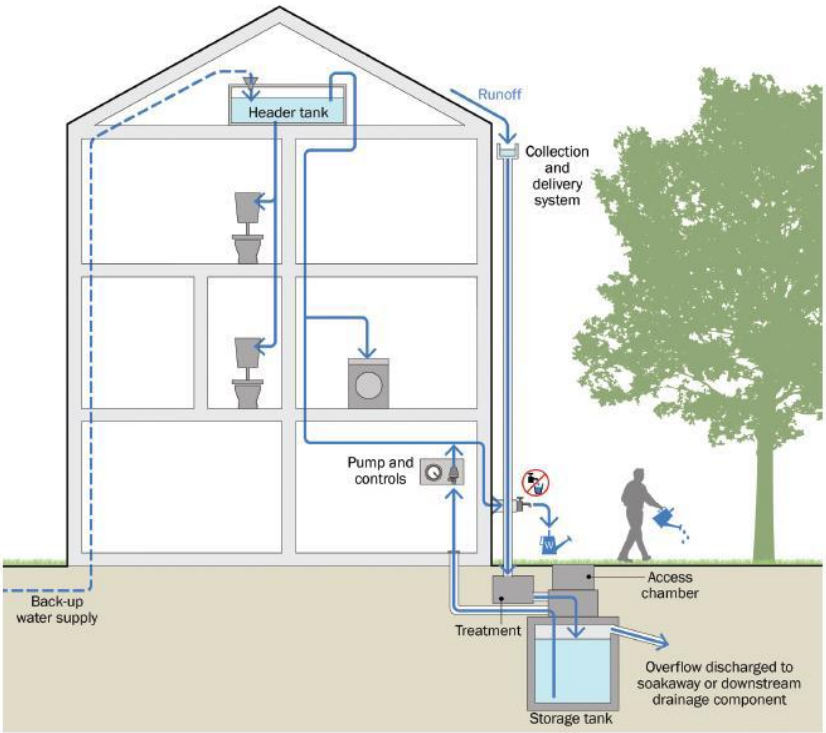


Fig. 5: *schema di un sistema RWH con serbatoio interrato, pompa e cisterna nel sottotetto. Si noti l'adduzione di acqua potabile alla cisterna (Back-up water supply) e lo sfioratore del serbatoio. Immagine tratta dalle diapositive di un seminario tenuto dall'Ing. A. Rizzo al Politecnico di Torino* [4]*; a sua volta l'immagine è tratta da "The SuDS Manual", Woods Ballard et al. 2015.*

1.4 Capacità ottimale del serbatoio

La capacità che deve avere il serbatoio è funzione della domanda e dell'offerta: in termini intuitivi, nel caso in cui, in un certo intervallo di tempo, ad esempio un anno, l'offerta sia superiore alla domanda, si può affermare che maggiore è la domanda, maggiore dovrà essere la capienza del serbatoio; quando invece la domanda supera l'offerta, questo non è più vero, infatti, in primo luogo non è necessaria una capienza maggiore poiché non c'è un ulteriore volume d'acqua piovana da accumulare e in secondo luogo la grande domanda fa sì che il livello nel serbatoio scenda rispetto a casi con domanda inferiore e che quindi sia sufficiente un serbatoio di minore capacità per adempiere alla funzione di compenso tra volumi in ingresso e in uscita. Nelle prossime righe si entrerà nel dettaglio di questi aspetti.
L'influenza che la capacità del serbatoio ha sul sistema di raccolta dell'acqua piovana può essere valutata calcolando alcuni volumi caratteristici, cumulati in un certo arco temporale e

successivamente calcolando due indici proposti dagli autori di un articolo scientifico, che è il principale riferimento di questa tesi, dal titolo "A scaleadaptive method for urban rainwater harvesting simulation" [5]. Il primo indice è il rapporto tra il volume di acqua piovana prelevato dalla popolazione, cioè che ha sostituito l'acqua potabile negli usi non potabili e la domanda d'acqua non potabile della stessa popolazione: esso è chiamato "Non Potable Water Savings" (NPWS); il secondo indice è il rapporto tra il volume di pioggia accumulato nel serbatoio e quello intercettato dal tetto ed è chiamato "Full Use of Rainwater Efficiency" (FURE). Le definizioni in termini matematici sono le seguenti:

$$NPWS = \frac{Volume\ di\ acqua\ piovana\ prelevato}{Volume\ di\ acqua\ non\ potabile\ richiesto} \tag{1.1}$$

$$FURE = \frac{Volume\ di\ acqua\ accumulato\ nel\ serbatoio}{Volume\ di\ acqua\ piovana\ intercettata\ dal\ tetto} \tag{1.2}$$

Quelli contenuti nelle formule (1.1) e (1.2) sono volumi cumulati in un *periodo di riferimento*: esso è opportuno che sia pari ad un multiplo intero di un anno, in modo da comprendervi all'interno le oscillazioni pluviometriche e quelle legate alla domanda dell'utenza, tutte e due caratterizzate da una periodicità annuale. Il periodo di riferimento quindi può essere annuale oppure pluriennale, coinvolgendo una serie di anni consecutivi. L'influenza della scelta del periodo di riferimento sugli indici NPWS e FURE verrà analizzata nel capitolo 6.
I dati di pioggia normalmente disponibili sono frutto di una registrazione a intervalli di tempo discreti; in particolare questa tesi fa riferimento ad altezze di pioggia registrate con cadenza giornaliera, pertanto il passo temporale che verrà utilizzato nel calcolo dei volumi cumulati è di un giorno, come viene suggerito nell'articolo scientifico di riferimento. Indicando la generica giornata appartenente al periodo di riferimento con la lettera i ($1 \leq i \leq N$, N = numero di giorni del periodo di riferimento), si può scrivere:

$$NPWS = \frac{\sum_1^N V_u(i)}{\sum_1^N V_r(i)} \tag{1.3}$$

$$FURE = \frac{\sum_1^N V_{acc}(i)}{\sum_1^N V_p^*(i)} \tag{1.4}$$

I termini che compaiono nelle sommatorie sono volumi, espressi in m^3, riferiti alla giornata *i-esima*:

- $V_u(i)$ volume di acqua piovana prelevato dal serbatoio e usato per fini non potabili
- $V_r(i)$ volume di acqua non potabile richiesto dall'intera popolazione dell'edificio (*domanda non potabile* dell'edificio)
- $V_f(i)$ volume contenuto nel serbatoio a fine giornata
- $V_i(i)$ volume contenuto nel serbatoio a inizio giornata
- $V_{acc}(i) = V_f(i) - V_i(i) + V_u(i)$ volume di acqua piovana accumulato nel serbatoio
- $p(i)$ altezza di pioggia caduta in un giorno (mm)
- A area del bacino (m^2)
- $V_p^*(i) = \frac{p(i)}{1000} \cdot A$ volume di acqua piovana intercettato dalla superficie del bacino (*offerta lorda giornaliera*)

Si noti come V_r sia il fabbisogno giornaliero non potabile degli abitanti dell'edificio, mentre V_u è il volume che essi possono realmente utilizzare, che dipende dal volume di acqua piovana contenuto nel serbatoio ed è al massimo pari a V_r . Ciò significa che nei giorni in cui V_u è inferiore a V_r il fabbisogno non potabile viene soddisfatto prelevando anche acqua potabile dall'acquedotto. Il volume contenuto nel serbatoio dipende sia dalla pioggia intercettata nella giornata *i-esima*, sia dalla pioggia intercettata in tutti i giorni precedenti.
Per poter calcolare gli indici NPWS e FURE è necessario conoscere il valore delle variabili elencate precedentemente in ogni giorno del periodo di riferimento: è quindi necessario costruire un modello matematico che simuli il funzionamento del serbatoio giorno per giorno, ossia che riceva come ingressi il valore giornaliero dell'altezza di pioggia, l'area del bacino e la domanda giornaliera non potabile dell'edificio e che restituisca in uscita il volume d'acqua piovana prelevato, il volume finale ed il volume accumulato. Questo modello verrà presentato nel capitolo 2.

1.4.1 Significato di NPWS e FURE

Per poter conoscere l'influenza della capacità del serbatoio V_s sul sistema di raccolta, gli indici NPWS e FURE vengono calcolati per valori diversi di V_s e ne viene rappresentato l'andamento su un piano. Prima di osservare direttamente questo andamento, è utile approfondire la conoscenza di numeratori e denominatori presenti nelle formule (1.3) e (1.4):

1. $\sum_1^N V_r(i)$ è la somma su tutto il periodo di riferimento della domanda giornaliera d'acqua non potabile dell'edificio, definita *domanda totale*
2. $\sum_1^N V_p^*(i)$ è la somma su tutto il periodo di riferimento dell'offerta lorda giornaliera di acqua piovana, definita semplicemente *offerta lorda*
3. $\sum_1^N V_u(i)$ è la somma sul periodo di riferimento del volume prelevato quotidianamente dal serbatoio (volume usato), definibile $V_{u,tot}$
4. $\sum_1^N V_{acc}(i)$ è la somma sul periodo di riferimento del volume accumulato quotidianamente nel serbatoio, definibile $V_{acc,tot}$

Per evidenziare i concetti fondamentali legati all'andamento di questi volumi al variare della capienza del serbatoio, si considerano due edifici ideali con area del tetto identica e popolazione molto diversa (fig. 6): l'edificio verde, a molti piani, è definibile *snello* e l'edificio giallo è definibile *tozzo*, poiché caratterizzato da un solo piano. Si assume che ogni piano contenga una famiglia di persone che consumano la stessa quantità di acqua a testa; si suppone inoltre che l'andamento dell'altezza di pioggia caduta nel periodo di riferimento sia lo stesso per i due edifici. Le conseguenze sono che l'edificio snello e l'edificio tozzo presentano la stessa offerta d'acqua piovana, ma il primo ha una richiesta d'acqua non potabile molto superiore al secondo.
Nella fig. 6 sono rappresentati in un grafico gli andamenti in funzione della capacità del serbatoio dei volumi elencati: la parte (a) è relativa all'edificio snello, che ha una domanda totale grande al punto da superare l'offerta netta, mentre la parte (b) è relativa all'edificio tozzo, con una domanda totale piccola al punto da essere inferiore all'offerta netta.
Riprendendo l'elenco precedente, la domanda totale e l'offerta (sia lorda che netta) sono quantità indipendenti dal valore della capacità del serbatoio, mentre quelle dei punti 3 e 4 dell'elenco ne sono invece dipendenti: $V_{acc,tot}$ aumenta con l'aumentare della capacità, in quanto è possibile accumulare più acqua e ha come valore massimo l'offerta netta; $V_{u,tot}$ è strettamente legato a $V_{acc,tot}$ poiché è dal serbatoio che viene attinta l'acqua e quindi anche $V_{u,tot}$ cresce con l'aumento della capacità fino a quando raggiunge il valore della domanda totale, che è il valore massimo di $V_{u,tot}$. In particolare, fintanto che $V_{u,tot}$ è inferiore alla

domanda totale, esso è anche inferiore o al più uguale a $V_{acc,tot}$: l'uguaglianza si verifica quando alla fine del periodo di riferimento il serbatoio risulta vuoto. Se invece il serbatoio non si svuota, la differenza massima possibile tra $V_{acc,tot}$ e $V_{u,tot}$ è pari al massimo volume contenibile nel serbatoio, ossia alla sua capacità, a cui viene sottratto il volume prelevato nella giornata *N-esima*, $V_u(N)$: in particolare, per avere un volume residuo nel serbatoio nella giornata *N-esima*, sicuramente $V_u(N)$ deve essere pari alla domanda della giornata stessa, $V_r(N)$, quindi in definitiva la differenza massima possibile tra $V_{acc,tot}$ e $V_{u,tot}$ è pari a $V_s - V_r(N)$. Utilizzando i valori delle applicazioni reali, la differenza tra $V_{acc,tot}$ e $V_{u,tot}$ risulta assai piccola, tanto che le due curve $V_{acc,tot}(V_s)$ e $V_{u,tot}(V_s)$ tendono a sovrapporsi: ammettendo un piccolo errore si può dire che la curva di $V_{u,tot}(V_s)$ è la stessa di $V_{acc,tot}(V_s)$ e quindi nella fig. 6 si è scelto di rappresentare solo la seconda delle due curve, chiamata "Volume accumulato" (linea rossa continua).
Come è stato detto, nel punto in cui $V_{u,tot}$ raggiunge il valore della domanda totale (ossia tutta la domanda dell'edificio è soddisfatta dall'acqua piovana), la curva $V_{u,tot}(V_s)$ si stabilizza sul valore della stessa domanda totale, come illustrato nella fig. 6(b) con la linea rossa tratteggiata, chiamata "Volume usato".

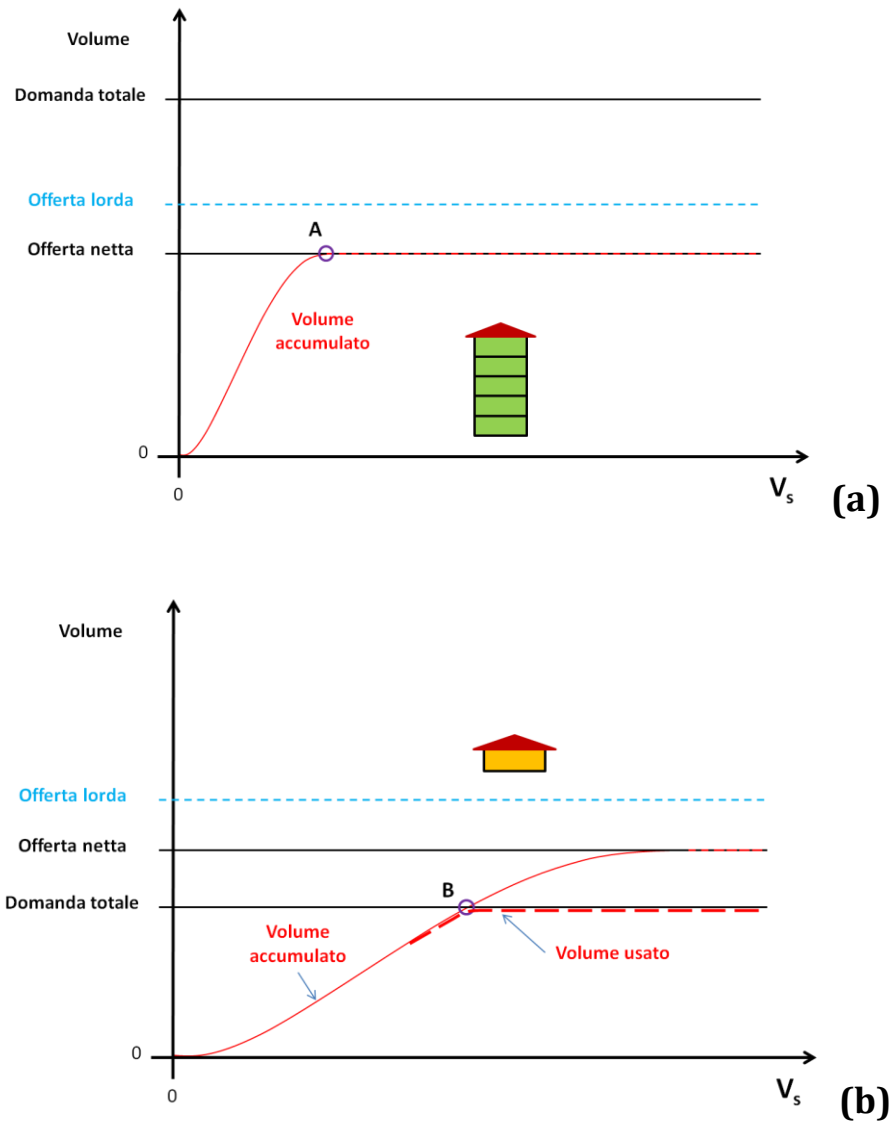


Fig. 6: *andamento del volume accumulato e del volume usato per due edifici con uguale area del tetto ma diverso numero di abitanti*

Nella fig. 6, si vede che il volume accumulato dall'edificio snello ha un andamento più ripido rispetto all'edificio tozzo: a parità di capienza del serbatoio, infatti, quanto più grande è la domanda, tanto più grande sarà il volume prelevato dal serbatoio e quindi la disponibilità ad accumulare ulteriore acqua piovana; di conseguenza sarà piccolo il volume tracimato. Da ciò deriva che la curva del volume accumulato dell'edificio snello raggiunge il valore dell'offerta netta con una capienza inferiore rispetto all'edificio tozzo. Come detto, il massimo delle curve dei volumi accumulati è pari all'offerta netta: infatti, anche se la capacità tendesse all'infinito, il massimo volume accumulabile sarebbe ovviamente pari all'offerta netta del periodo di riferimento. Si nota quindi che la domanda d'acqua non potabile dell'edificio snello non è mai totalmente sostituibile con acqua piovana, mentre l'offerta è più che sufficiente a soddisfare le esigenze dell'edifico tozzo se associata ad un valore di capacità uguale o superiore all'ascissa del punto B.
A questo punto, dato che gli indici NPWS e FURE sono i rapporti tra le quantità rappresentate in fig. 6, si può capirne facilmente l'andamento in funzione della capacità del serbatoio (fig. 7). Si riprendano infatti le definizioni (1.3) e (1.4) e si osservi la fig. 6: nel caso dell'edificio snello (parte a) l'indice NPWS è il rapporto tra i valori che stanno sulla curva rossa ed il valore costante della domanda totale, mentre l'indice FURE è il rapporto tra la curva rossa ed il valore costante dell'offerta lorda (linea azzurra tratteggiata). Nel caso dell'edificio tozzo (parte b) l'indice NPWS è il rapporto tra la curva rossa e la linea della domanda totale fino all'intersezione tra le due curve, oltre invece la curva del $V_{u,tot}$ si sovrappone a quella della domanda, come rappresentato con la curva rossa tratteggiata e quindi NPWS è pari a 1; il FURE è come prima il rapporto tra la curva rossa continua e la linea azzurra tratteggiata. Nella fig. 6 sono inoltre indicati i punti in cui viene raggiunto il massimo NPWS: il punto A per l'edificio snello e il punto B per l'edificio tozzo, per il quale questo massimo vale 1.
Si osservi dunque la fig. 7: l'indice NPWS è quindi il grado col quale l'acqua piovana sostituisce l'acqua potabile usata per fini non potabili e può variare tra zero e uno. NPWS è il rapporto tra una quantità variabile con la capacità ed una costante, quindi il suo grafico ha una forma molto simile a quello del volume usato, che come si è già spiegato è praticamente coincidente con la curva del volume accumulato fino al raggiungimento della domanda: il massimo NPWS si ottiene quindi nell'edificio snello con una capacità inferiore a quella necessaria all'edificio tozzo per raggiungere tale massimo (ascisse dei punti A e B, fig. 6), tuttavia in fig. 7 si vede che l'edificio tozzo raggiunge il valore unitario, mentre l'edificio snello può al massimo sopperire ad una parte della sua domanda.
Per quanto riguarda l'andamento dell'indice FURE, essendo il rapporto tra il volume accumulato (variabile) e l'offerta netta (costante e comune ai due edifici), esso è semplicemente il grafico di fig. 6 scalato: il valore minimo è zero e il valore massimo è un numero inferiore a uno e dipendente dalla differenza tra offerta lorda e netta. Ricordando l'andamento della curva del volume accumulato, il massimo di FURE viene raggiunto dall'edificio snello con una capacità inferiore rispetto all'edificio tozzo: in particolare la capacità che corrisponde al massimo di FURE dell'edificio snello è esattamente pari a quella che porta al massimo di NPWS di quell'edificio; per l'edificio tozzo invece il massimo di FURE è raggiunto con una capacità superiore a quella che conduce al massimo di NPWS, poiché per soddisfare l'intera domanda non potabile è sufficiente utilizzare una frazione dell'offerta netta.
L'indice FURE misura quindi l'efficienza nel raccogliere e accumulare l'offerta lorda; d'altra parte, è anche una misura del volume tracimato dal serbatoio: un basso FURE indica un grande volume d'acqua tracimato, che viene inviato alla fognatura. Il valore massimo dell'indice FURE, definibile $FURE_{limite}$, è in generale dipendente dalla sola relazione tra l'altezza di pioggia, il coefficiente di deflusso e l'altezza di first flush, mentre è indipendente dall'area del tetto. Per dimostrare questo aspetto, si ricorda che quando la capacità del

serbatoio è tale da rendere l'indice FURE massimo, non avviene alcuno sfioro, ossia tutta l'acqua raccolta dal tetto viene accumulata nel serbatoio. Siccome l'area è costante nel tempo, può essere portata fuori dal segno di sommatoria, così come il coefficiente di conversione 1000; in termini matematici:

$$FURE_{limite} = \frac{\sum_1^N V_{acc}(i)}{\sum_1^N V_p^*(i)} = \frac{\frac{A}{1000}\sum_1^N h(i)}{\frac{A}{1000}\sum_1^N p(i)} = \frac{\sum_1^N h(i)}{\sum_1^N p(i)}$$

dove *h(i)* è un modo compatto per scrivere il valore dell'altezza di pioggia raccolta:

$$h(i) = \begin{cases} p(i) \cdot \phi - ff & se\ p(i) \cdot \phi > ff \\ 0 & se\ p(i) \cdot \phi \leq ff \end{cases}$$

Questo dimostra che l'indice $FURE_{limite}$ è indipendente dall'area del tetto dell'edificio.

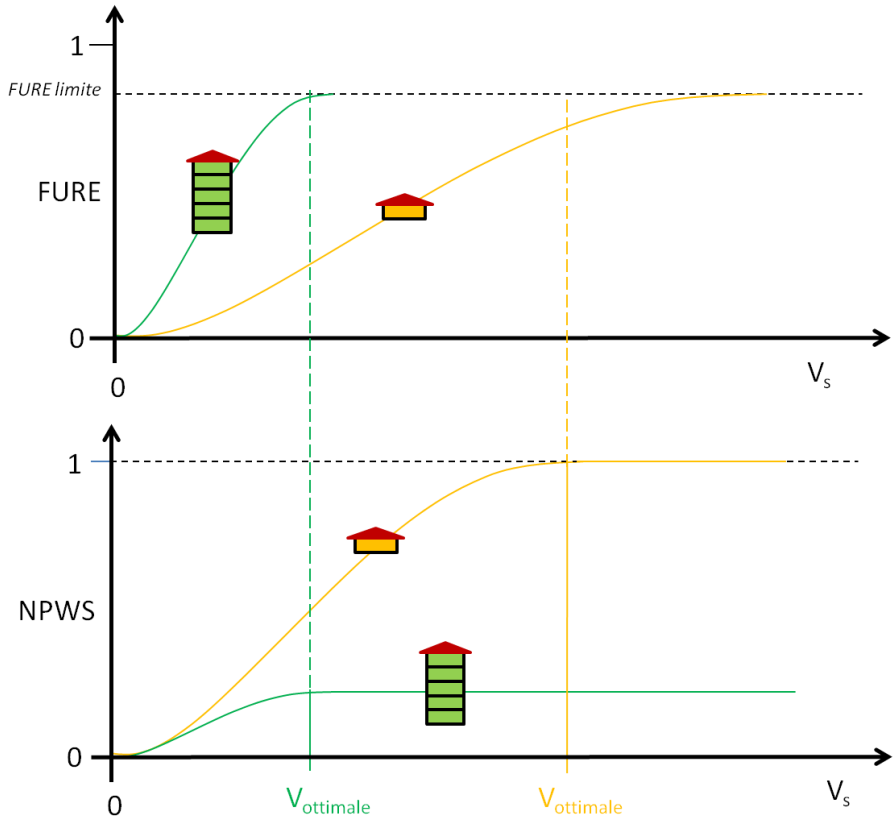


Fig. 7: *andamento di FURE e NPWS in funzione della capacità del serbatoio in edifici di caratteristiche diverse*

I due edifici dell'esempio sono dei casi particolari, tuttavia emerge chiaramente come un parametro fondamentale che caratterizza gli edifici nei riguardi dell'uso di acqua piovana, a parità di pioggia, sia il rapporto tra l'area del bacino e il numero di occupanti, ossia il parametro *area pro capite* dell'edifico.
Alla luce di quanto è stato detto, le prime righe del paragrafo 1.4 possono ora essere riassunte dal grafico di fig. 8, nel quale è stato rappresentato l'andamento del volume accumulato e del volume usato (con i simboli usati in precedenza) per quattro edifici con uguale area del tetto, uguale andamento temporale dell'altezza di pioggia e domanda diversa, crescente dall'1 al 4: le ascisse dei punti A, B, C e D sono le capacità ottimali, che, come si è detto, crescono con la

domanda fino ad un massimo, nel caso in cui la domanda sia superiore all'offerta, mentre decrescono con essa quando l'offerta è inferiore alla domanda.

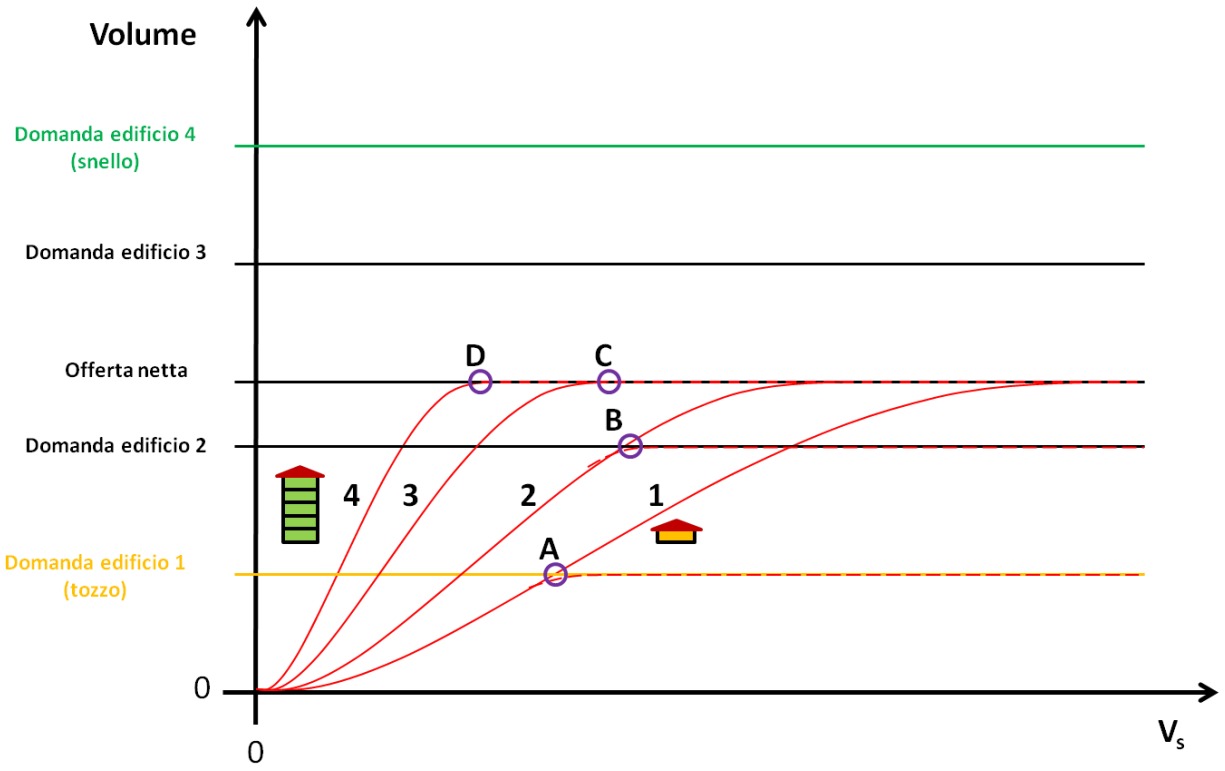


Fig. 8: *andamento del volume accumulato, del volume usato e della capacità ottimale per edifici con uguale area e domanda crescente dal tipo 1 al tipo 4.*

1.4.2 Criterio di scelta del serbatoio

Il criterio che verrà adottato per stabilire la capacità ottimale del serbatoio è stato proposto nell'articolo scientifico [5] e tiene conto di due aspetti: da un lato si vuole ridurre al minimo i consumi di acqua potabile usata per fini non potabili, che significa avere un NPWS alto; dall'altro lato si vuole utilizzare il più piccolo serbatoio possibile per raggiungere tale obiettivo, poiché alla dimensione del serbatoio si suppone che sia legato il suo costo: nella fig. 7 viene quindi mostrata la capacità ottimale dei serbatoi dei due edifici (V_{ott}).

Una volta calcolati i valori di NPWS e di FURE corrispondenti alla capacità ottimale del serbatoio di un edificio, tali valori diventano gli indici di riferimento di quel particolare edificio per il calcolo del risparmio idrico.

1.5 Scala cittadina

Tutto ciò di cui si è parlato è la scelta del serbatoio ottimale e dei corrispondenti indici di efficienza del serbatoio di un edificio, tuttavia questa tesi è interessata ad analizzare un'intera città, vale a dire un insieme di edifici; si vuole calcolare per ognuno la propria capacità ottimale e i corrispondenti indici NPWS e FURE.

In una città di un milione di abitanti il numero di edifici è molto grande, nell'ordine delle decine di migliaia; i calcoli da svolgere per poter simulare esattamente ciò che succede nella realtà dovrebbero essere sviluppati per ogni singolo edificio. In questo modo l'approccio sarebbe quasi del tutto deterministico: note l'area del bacino di ogni edificio e la sua popolazione interna attuale, assumendo una certa richiesta d'acqua non potabile pro capite (che è un dato statistico), si potrebbe simulare l'andamento del volume accumulato e del volume usato al variare della capacità del serbatoio. Si otterrebbe così una fotografia del risparmio idrico potenziale basato su dati esatti, che sono però validi nel solo momento in cui sono stati rilevati.
Svolgere questa mole di calcoli non ha però molto senso: le città mutano, poiché nel tempo varia sia il numero di edifici, che generalmente cresce, sia la popolazione.
Si preferisce dunque adottare un approccio diverso, che si basa sulla statistica ed individua gli edifici più frequenti nel panorama cittadino, sui quali concentrare l'attenzione.
La città viene suddivisa in zone; all'interno di ognuna si considererà un insieme di *edifici rappresentativi* dell'intero patrimonio edilizio residenziale: per ognuno si calcolerà la capacità ottimale del serbatoio e gli indici NPWS e FURE corrispondenti. I valori di NPWS ottimali (ossia corrispondenti alla capacità ottimale) di tali edifici verranno mediati tenendo conto della diffusione di ogni tipologia di edificio, al fine di ottenere un indice *NPWS di zona*, che caratterizzerà ognuna delle porzioni della città, in modo da poter costruire una *mappa* del potenziale risparmio idrico non potabile.

2 Metodo di calcolo del risparmio idrico

2.1 Funzionamento del serbatoio di un edificio

In questo capitolo vengono presentate le operazioni logiche e i calcoli che simulano il funzionamento del serbatoio di capacità V_s a servizio di un edificio, che è caratterizzato dai suoi due parametri essenziali: l'*area del tetto* e la *domanda d'acqua non potabile giornaliera.* Queste operazioni si basano sull'equazione di conservazione della massa liquida, o, più semplicemente, del volume di acqua. L'unico punto del sistema in cui si può realizzare un accumulo è il serbatoio. L'equazione è la seguente:

$$Q_{in} - Q_{out} = \frac{dV}{dt} \tag{2.1}$$

i simboli hanno il seguente significato:

- Q_{in} è la portata in ingresso nel serbatoio, che dipende principalmente dalla pioggia e dall'area del tetto;
- Q_{out} è la portata in uscita dal serbatoio, che dipende dalla richiesta d'acqua da parte della popolazione dell'edificio e dalla portata tracimata dal serbatoio;
- V è il volume di acqua contenuto nel serbatoio

Come si è già anticipato nel paragrafo 1.4, in questa tesi si utilizzano valori discreti della precipitazione e della domanda d'acqua, noti ad intervalli giornalieri; per questo motivo la (2.1) viene integrata nell'intervallo di una giornata (2.2), tenendo presente che gli integrali nel tempo delle portate Q_{in} e Q_{out} sono i corrispondenti volumi giornalieri entrante e uscente. Si ottiene così la (2.3).

$$\int_0^{24\ ore} (Q_{in} - Q_{out})\, dt = \int_0^{24\ ore} dV \tag{2.2}$$

$$V_{in} - V_{out} = V_f - V_i \tag{2.3}$$

Indicando con i la generica giornata appartenente al periodo di riferimento, la (2.3) è dunque il bilancio di volumi della i-esima giornata di tale periodo. Come è stato già scritto, questo periodo può essere di un anno o pluriennale, quindi

$$1 \leq i \leq N, \quad N = 365 \cdot n$$

con n pari al numero degli anni di tale periodo.
I simboli hanno il seguente significato:

- V_{in} volume di acqua entrato nel serbatoio nell'intervallo di una giornata
- V_{out} volume di acqua uscito dal serbatoio nell'intervallo di una giornata

- V_f volume nel serbatoio a fine giornata;
- V_i volume nel serbatoio ad inizio giornata.

I dati che consentono di calcolare tali volumi sono i seguenti:

- A(m²) area del tetto
- $p(i)$ (mm) altezza di pioggia misurata nella giornata *i-esima*
- ϕ coefficiente di deflusso del bacino
- ff (mm) altezza di acqua di prima pioggia (first flush)
- V_s (m³) capacità del serbatoio
- $V_r(i)$ (m³) domanda giornaliera di acqua non potabile dell'edificio, che può dipendere dal tempo (indice i)

Il prelievo viene immaginato come se avvenisse in un unico istante, quindi non distribuito nell'arco della giornata; per poter tenere conto, seppur in modo approssimativo, di ciò che avviene nella realtà, si aggiunge all'elenco un coefficiente proposto dagli autori dell'articolo scientifico [5], che permette di distribuire il volume di pioggia raccolto dal tetto in due parti: la parte raccolta prima del prelievo quotidiano e la parte raccolta dopo di esso. La prima parte entra nel serbatoio in funzione del volume disponibile ad accoglierla, ossia in funzione della differenza tra la sua capacità e il volume contenuto a inizio giornata e può quindi andare a far parte del volume disponibile ad essere prelevato per le esigenze degli abitanti. La seconda parte, cioè la parte di acqua piovana raccolta dopo il prelievo, entra anch'essa nel serbatoio in funzione del volume che è disponibile ad accoglierla e può quindi andare a far parte del volume presente nel serbatoio a fine giornata, che diventa la *condizione iniziale* della giornata successiva. Questo coefficiente moltiplica il volume raccolto quotidianamente e viene chiamato a:

- a frazione del volume d'acqua piovana raccolto prima del prelievo

Una volta noti i dati che sono stati elencati si può procedere con i calcoli.
Il volume d'acqua piovana intercettata dal tetto è pari a:

$$V_p^* \ (m^3) = \frac{p \ (mm)}{1000} A(m^2) \tag{2.4}$$

Il volume di acqua effettivamente raccolta è solo una parte dell'acqua intercettata :

$$\begin{aligned} V_p &= V_p^* \cdot \phi - V_{ff} \quad & se \ V_p^* \cdot \phi > V_{ff} \\ V_p &= 0 & se \ V_p^* \cdot \phi \leq V_{ff} \end{aligned} \tag{2.5}$$

dove V_{ff} è il volume di acqua di prima pioggia scartato:

$$V_{ff} \ (m^3) = \frac{ff \ (mm)}{1000} A(m^2) \tag{2.6}$$

La formula (2.5) prevede che l'acqua di prima pioggia venga sempre sottratta al volume intercettato, qualunque sia la durata dell'evento piovoso. Ciò è molto cautelativo, poiché in un

evento lungo più di un giorno, l'acqua che andrebbe scartata sarebbe solo quella caduta nella fase iniziale; anche per eventi che contengano brevi pause, non sarebbe necessario scartare l'acqua che cade nelle riprese successive alla prima fase.
Il bilancio tra i volumi in ingresso nel serbatoio e i volumi in uscita da esso deve essere svolto per ogni giorno del periodo di riferimento, come anticipato nel paragrafo 1.4. Nei successivi paragrafi 2.1.1 e 2.1.2 vengono introdotte le operazioni logiche e i calcoli da svolgere per il generico giorno, ossia la simulazione di una giornata; una volta stabilito il nesso che lega due giornate successive (paragrafo 2.1.3) e la condizione iniziale da porre al principio del periodo di riferimento, la simulazione di una giornata verrà concatenata alla successiva e così via, fino all'ultimo giorno del periodo di riferimento, generando un ciclo iterativo.

2.1.1 Volume prelevato

Per chiarezza viene ora resa esplicita la dipendenza delle variabili dal tempo, ossia le equazioni vengono scritte riferendosi alla giornata i-esima. Si assume inoltre che a non vari nel tempo. Le operazioni logiche descritte nel presente paragrafo e nel successivo sono riassunte nel diagramma di flusso di fig. 9.
L'acqua disponibile nel momento del prelievo è pari al volume contenuto nel serbatoio sommato a quello raccolto fino a quel momento, ossia

$$V_i(i) + a \cdot V_p(i) \tag{2.7}$$

a questo punto bisogna confrontare questo volume con la capacità del serbatoio per stabilire se vi sia uno sfioro. Infatti, se

$$V_i(i) + a \cdot V_p(i) \leq V_s \tag{2.8}$$

allora il serbatoio è al più pieno, ma non avviene nessuno sfioro.
Inoltre, se

$$V_i(i) + a \cdot V_p(i) \geq V_r(i) \tag{2.9}$$

allora il volume contenuto nel serbatoio basta a soddisfare la domanda non potabile dell'edificio, quindi il volume realmente prelevato dall'utenza $V_u(i)$ è pari alla sua domanda:

$$V_u(i) = V_r(i) \tag{2.10}$$

oppure, se il volume disponibile non è sufficiente a soddisfare la domanda:

$$V_i(i) + a \cdot V_p(i) < V_r(i) \tag{2.11}$$

allora il $V_u(i)$ è pari al massimo volume disponibile, ossia:

$$V_u(i) = V_i(i) + a \cdot V_p(i) \tag{2.12}$$

Si torni ora alla disequazione (2.8). Se il suo verso fosse opposto, ossia se il volume che dovrebbe accumularsi prima del prelievo fosse superiore alla capacità del serbatoio, allora una parte di esso tracimerebbe e quindi verrebbe perduto. In queste condizioni il serbatoio si riempie comunque e quindi il volume disponibile al prelievo è V_s; per questo motivo, se la domanda è inferiore alla capacità del serbatoio, ossia se è vera la disequazione seguente

$$V_r(i) < V_s \tag{2.13}$$

allora l'intera domanda viene soddisfatta:

$$V_u(i) = V_r(i) \tag{2.14}$$

Se invece la domanda supera la capacità del serbatoio:

$$V_r(i) \geq V_s \tag{2.15}$$

allora viene prelevato un volume pari alla capacità stessa (che può bastare o essere insufficiente alla soddisfazione della domanda a seconda dei casi):

$$V_u(i) = V_s \tag{2.16}$$

Alla fine di questi confronti, si è dunque stabilito qual è il volume $V_u(i)$ prelevato dagli abitanti nella giornata i-esima.

2.1.2 Volume finale

Dopo aver stabilito il valore del volume prelevato, si può calcolare il volume d'acqua piovana contenuto nel serbatoio a fine giornata. Innanzitutto occorre stabilire, come è già stato fatto, se ci sia stato uno sfioro prima del prelievo. Se dunque c'è stato uno sfioro, risulta vera la disequazione

$$V_i(i) + a \cdot V_p(i) > V_s \tag{2.17}$$

e il serbatoio è pieno al momento del prelievo. Il volume presente a fine giornata $V_f(i)$ dipende dal confronto tra il volume prelevato $V_u(i)$ dal serbatoio ed il volume raccolto dopo il prelievo, ossia $(1 - a) \cdot V_p(i)$. Infatti, se è vero che

$$V_u(i) > (1 - a) \cdot V_p(i) \tag{2.18}$$

allora il volume raccolto dopo il prelievo è insufficiente a riempire nuovamente il serbatoio; di conseguenza il volume finale è pari a:

$$V_f(i) = V_s - V_u(i) + (1 - a) \cdot V_p(i) \tag{2.19}$$

Se invece il volume prelevato è inferiore o al più uguale a ciò che viene raccolto dopo il prelievo, ossia

$$V_u(i) \leq (1 - a) \cdot V_p(i) \tag{2.20}$$

allora il serbatoio si riempie nuovamente (e tracima nel caso in cui il volume prelevato sia strettamente minore di quello raccolto dopo il prelievo), quindi:

$$V_f(i) = V_s$$

Si torni ora alla (2.17) e si analizzi il caso opposto, ossia quando dal serbatoio non tracima alcun volume d'acqua fino al momento del prelievo, ossia:

$$V_i(i) + a \cdot V_p(i) \leq V_s \tag{2.21}$$

In questo caso, se il volume raccolto dopo il prelievo porta ad un volume contenuto nel serbatoio inferiore alla sua capacità:

$$V_i(i) + a \cdot V_p(i) - V_u(i) + (1 - a) \cdot V_p(i) < V_s \tag{2.22}$$

allora non si verificano sfiori nemmeno dopo il prelievo e il volume finale è

$$V_f(i) = V_i(i) + a \cdot V_p(i) - V_u(i) + (1 - a) \cdot V_p(i) \tag{2.23}$$

se invece il volume di acqua piovana raccolto dopo il prelievo porta ad un volume nel serbatoio uguale o superiore alla sua capacità (disequazione (2.22) con verso opposto), ossia

$$V_i(i) + a \cdot V_p(i) - V_u(i) + (1 - a) \cdot V_p(i) \geq V_s \tag{2.24}$$

allora il serbatoio si riempie e si genera uno sfioro nel caso in cui il verso della disequazione (2.24) sia strettamente maggiore; il volume finale è pari alla capacità:

$$V_f(i) = V_s \tag{2.25}$$

2.1.3 Ciclo iterativo

Si è dunque giunti a conoscere il volume d'acqua piovana contenuto nel serbatoio a fine giornata; esso è esattamente pari al volume contenuto nel serbatoio all'inizio della giornata successiva. In questo modo si possiede la *condizione iniziale* del giorno successivo (individuato dall'indice *i+1*):

$$V_i(i+1) = V_f(i) \tag{2.26}$$

L'unico giorno per il quale serve definire una condizione iniziale è il primo del periodo di riferimento, ossia $V_i(1)$.
Una volta noti il volume prelevato e il volume finale, si può calcolare il volume di acqua complessivamente accumulato nel serbatoio:

$$V_{acc}(i) = V_f(i) - V_i(i) + V_u(i) \tag{2.27}$$

Per verificare la formula (2.27) si può analizzare il caso particolare in cui siano verificate le (2.21) e (2.22), ossia una situazione in cui non si generino sfiori, assumendo che il volume prelevato $V_u(i)$ sia pari al volume di acqua raccolta nell'intera giornata $V_p(i)$ (che significa inoltre considerare il parametro a=1): in questo caso particolare tutto il volume entrato nel serbatoio è stato prelevato, quindi $V_f(i)$ e $V_i(i)$ coincidono, ma il volume accumulato $V_{acc}(i)$ non è nullo, bensì pari a $V_u(i)$. Quando invece non piove nell'arco della giornata *i*-esima, allora il volume accumulato $V_{acc}(i)$ è nullo, infatti $V_f(i)$ è pari a $V_i(i)$ - $V_u(i)$ e quindi tutti i termini a secondo membro si elidono.
Si noti che la differenza tra $V_{acc}(i)$ e $V_p(i)$ è esattamente pari al volume sfiorato, che viene inviato alla fognatura.
Le operazioni descritte nei paragrafi 2.1.1 e 2.1.2 vengono ripetute, in un ciclo iterativo, per tutti i valori interi dell'indice *i* compresi nell'intervallo

$$1 \leq i \leq N, \quad N = 365 \cdot n$$

dove n è il numero di anni del periodo di riferimento. Dato che N può essere molto grande, per potere reiterare il ciclo un gran numero di volte, le operazioni vengono tradotte in un programma *Matlab*, al fine di essere eseguite dal calcolatore.
Questo ciclo iterativo è rappresentato in modo sintetico nel diagramma di flusso della fig. 9.

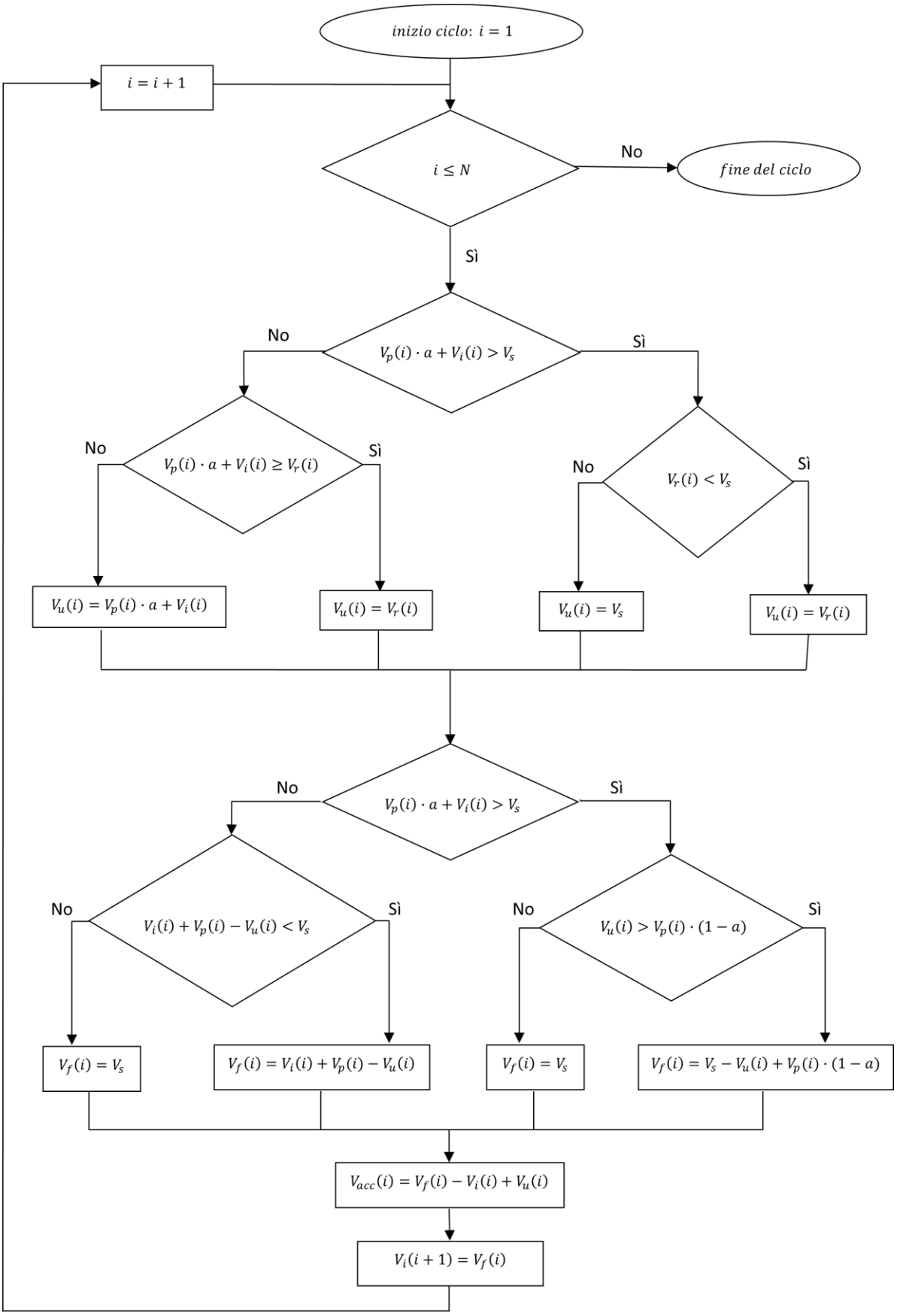


Fig. 9: *diagramma di flusso del modello di calcolo*

Alla fine del ciclo iterativo che scorre tutti i giorni del periodo scelto per la simulazione, vengono calcolati gli indici FURE e NPWS:

$$FURE = \frac{\sum_{i=1}^{N} V_{acc}(i)}{\sum_{i=1}^{N} V_p^*(i)} \tag{2.28}$$

$$NPWS = \frac{\sum_{i=1}^{N} V_u(i)}{\sum_{i=1}^{N} V_r(i)} \tag{2.29}$$

Come è stato già scritto, si è interessati a conoscere l'andamento dei due indici al variare della capacità del serbatoio. A tal fine è necessario ripetere tutte le operazioni riportate nel diagramma di flusso per una serie di valori possibili di capacità del serbatoio, vale a dire costruire un ciclo iterativo esterno, identificato dall'indice j, $1 \leq j \leq J$; usando il linguaggio *Matlab*, V_s viene dunque ridefinito come un vettore di possibili capacità che può avere il serbatoio:

$$V_s\ (m^3) = [V_{s1} \quad V_{s2} \quad V_{s3} \quad V_{s4} \quad \cdots \quad V_{sJ}] \tag{2.30}$$

Una volta calcolati NPWS e FURE per tutti i valori di j, si vuole conoscere la capacità ottimale del serbatoio (V_{ott}): come propongono gli autori dell'articolo scientifico [5] essa può essere definita come quella capacità V_{sj} per cui un incremento della stessa porta ad un aumento dell'NPWS inferiore al 5%. Il corrispondente NPWS viene denominato $NPWS_{ott}$ mentre al corrispondente FURE non viene assegnato un nome particolare. Si ricorda che questo calcolo ha finora preso in considerazione un solo edificio.

2.2 NPWS di zona

Ognuna delle zone in cui viene suddivisa la città contiene un certo numero K di *tipi di edificio* significativi, ossia molto diffusi, definiti con il pedice k. I tipi di edificio che si suppongono essere significativi sono quelli con una frequenza percentuale f_k almeno pari al 10%. Ogni tipo è rappresentato da un *edificio rappresentativo*, caratterizzato da una sua area del tetto e una sua domanda giornaliera non potabile:

- $A_k\ (m^2)$
- $V_{r,k}(i)\ \ (m^3)$

Per ognuno degli *edifici rappresentativi* vengono svolti i calcoli visti nei paragrafi 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3, che portano alla conoscenza della sua capacità ottimale $V_{ott,k}$ e i suoi corrispondenti valori $NPWS_{ott,k}$ e $FURE_k$. Questi tre risultati vengono estesi a tutti gli edifici appartenenti al tipo k.
Per calcolare l'indice NPWS di zona si opera con una media pesata sulla frequenza percentuale f_k dei tipi di edificio considerati: la somma delle frequenze non è necessariamente 100% poiché vengono considerati solo gli edifici con una frequenza superiore alla soglia del 10%, quindi la frequenza percentuale dell'edificio *k-esimo* viene normalizzata rispetto alla somma delle frequenze percentuali dei K^* tipi di edificio che superano la soglia. In simboli:

$$NPWS\ di\ zona = \frac{\sum_{k=1}^{K^*} NPWS_{ott,k} \cdot f_k}{\sum_{k=1}^{K^*} f_k} \tag{2.31}$$

2.3 Risparmio idrico

L'indice $NPWS_{ott}$ indica, per ogni edificio k dotato della propria capacità ottimale, la frazione della domanda non potabile che verrebbe soddisfatta dall'acqua piovana raccolta e utilizzata. Per conoscere il corrispondente volume d'acqua piovana usata, che è pari al volume di acqua potabile risparmiata, si deve moltiplicare $NPWS_{ott}$ per la domanda d'acqua non potabile dell'intero periodo di riferimento:

$$V_{risp.k} = NPWS_{ott,k} \cdot \sum_{i=1}^{N} V_{r,k}(i) \tag{2.32}$$

oppure si può utilizzare la formula (2.33), tenendo presente che $V_u(i)$ dipende dalla capacità del serbatoio e quindi tale formula deve riferirsi alla condizione di capacità ottimale, come ricordato dai simboli:

$$V_{risp.k} = \sum_{i=1}^{N} V_{u,k}(i)\Big|_{V_{ott}} \tag{2.33}$$

Il volume risparmiato nell'intera zona è la somma dei volumi risparmiati da tutti gli edifici del modello semplificato, ossia da tutti gli edifici con caratteristiche identiche all'edificio rappresentativo appartenenti ad ognuno dei K^* tipi che superano la soglia ; in simboli:

$$V_{risp.zona} = \sum_{k=1}^{K^*} V_{risp.k} \cdot f_k^{norm} \cdot n°\ edifici \tag{2.34}$$

dove:

- $f_k^{norm} = \frac{f_k}{\sum_{k=1}^{K^*} f_k}$ è la frequenza degli edifici di tipo k normalizzata rispetto alla somma delle K^* frequenze percentuali superiori al 10%;
- $n°\ edifici$ numero totale di edifici presenti nella zona

3 Applicazione del metodo alla città di Torino

Il metodo esposto nel capitolo 2 viene ora applicato alla città di Torino, che è situata nell'alta pianura Padana alla confluenza dei fiumi Dora Riparia e Po e che nel 2011 aveva una popolazione di 872 367 abitanti (ISTAT, [9]), che ne fanno ancora oggi la quarta città italiana più popolosa.

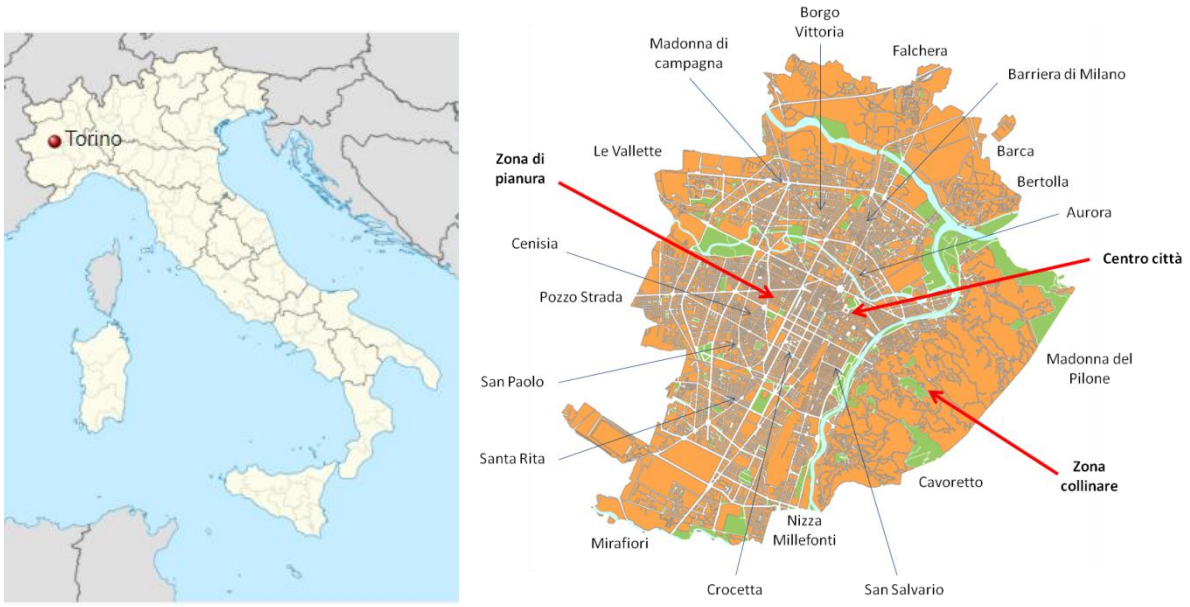


Fig. 10: *carta dell'Italia con l'indicazione della posizione di Torino* [10] *e carta topografica cittadina dove sono segnate in bianco le strade, in turchese i fiumi e in verde i parchi* [11] e sulla quale so*no stati indicati i nomi di alcuni quartieri.*

Il territorio della città di Torino è equamente suddiviso tra una parte collinare a est e una parte di pianura a ovest; queste due zone sono estremamente differenti riguardo i tipi di abitazioni. Sulla collina, la presenza di piccole valli fa sì che le abitazioni siano concentrate soprattutto nelle zone dei crinali e in generale esse sono prevalentemente case a pochi piani (da 1 a 3) munite di giardini talvolta molto ampi. La parte in pianura è preponderante, essendo la città vera e propria, dove si trova il centro storico e dove hanno sede le principali istituzioni cittadine: questa parte è organizzata in isolati sensibilmente ortogonali e costituiti prevalentemente da palazzi a più piani (da 2 a 10). Osservando un'immagine aerea si può notare facilmente che nella parte collinare della città è forte la presenza di aree boschive, di prati e giardini e che invece è bassa la densità di abitazioni, mentre la parte di pianura è quasi totalmente edificata, fatti salvi i giardini pubblici distribuiti in tutta la città e i giardini privati delle basse case di periferia.
La parte di città più importante per densità di edifici residenziali è quindi quella di pianura, che si è espansa a più riprese dopo la sua elevazione al rango di capitale del ducato di Savoia (inizio del '600, [10]), mentre la collina a quel tempo era una zona agricola, popolata da fattorie, come del resto tutta la zona di pianura esterna alla città antica. La parte di pianura della città si è dunque espansa in tempi successivi e ciò ha portato, in alcuni casi, ad avere

zone ben distinte in termini di caratteristiche urbanistiche ed edilizie ed abbastanza omogenee al loro interno. Una suddivisione qualitativa di queste zone può essere la seguente:

- centro storico, edificato principalmente fino al '600-'700, presenta case con cortile interno, tipicamente a 3-5 piani;
- espansione del '700-'800 (come ad esempio i quartieri San Secondo e San Salvario), caratterizzata da case sviluppate attorno ad un cortile e dalle case "di ringhiera"; la forma in pianta è più regolare rispetto al centro storico;
- espansione di fine '800-primo '900, come ad esempio alcune parti dei quartieri Crocetta, Cenisia, San Paolo, caratterizzata da palazzine a 4-6 piani con una pianta a 2-3 appartamenti per piano;
- espansione del Secondo dopoguerra, caratterizzata da palazzine in calcestruzzo armato con un numero di piani variabile tra 5 e 10 (ad esempio i quartieri Santa Rita, Mirafiori, Pozzo Strada, Falchera, Le Vallette).

Questa suddivisione è tuttavia alquanto approssimativa, poiché nei quartieri costruiti al tempo della grande espansione demografica ed edilizia del Secondo dopoguerra è frequente trovare edifici più antichi, specialmente del primo Novecento, che si distinguono per essere più bassi di quelli a loro vicini: nel quartiere di Santa Rita, ad esempio, sono presenti villette liberty a due piani, in un contesto edilizio di palazzine quasi totalmente costruite negli anni '60-'70 del Novecento, così come sono presenti (rare) fattorie, per lo più adibite ad altri usi, testimonianza del passato agricolo di quelle aree oggi totalmente urbanizzate.
La simulazione del funzionamento del serbatoio dell'RWH necessita come si è visto della conoscenza di alcuni dati di base.
Continuando ad usare termini del lessico economico, l'*offerta* dipende dai seguenti dati di base:

1. altezza di pioggia giornaliera
2. area del tetto degli edifici
3. perdite dovute al trattenimento di acqua da parte del tetto, quantificato dal coefficiente di deflusso, e dovute alla quantità di acqua da scartare, ovvero l'altezza di acqua di prima pioggia

mentre la *domanda* è conveniente vederla come prodotto di altri due dati di base:

4. domanda giornaliera d'acqua non potabile pro capite
5. occupanti, ossia il numero di persone che vivono nell'edificio.

3.1 Edifici

La città di Torino deve essere suddivisa in zone in modo da poter scegliere all'interno di ognuna di esse l'insieme di edifici che siano rappresentativi dei tipi più diffusi, per i quali simulare il funzionamento del serbatoio e quindi arrivare a conoscerne la capacità ottimale e i corrispondenti indici di efficienza.
Il passo iniziale è definire il significato del termine *tipo di edificio*, serve cioè classificare gli edifici presenti sul territorio secondo opportuni parametri e conoscerne per ogni classe la quantità. Si è visto nel paragrafo 1.4.1 che i parametri fondamentali che determinano l'entità del risparmio idrico di una casa e la sua capacità ottimale sono l'area del tetto e il numero di abitanti dell'edificio: ne discende, ad esempio, che più grande è la quantità di edifici tozzi

presenti in una zona, più grande sarebbe il volume d'acqua piovana a disposizione degli abitanti e quindi il risparmio di acqua potabile. Per i fini di questa tesi la migliore classificazione degli edifici di una città sarebbe pertanto quella basata sui due parametri dell'area del tetto e del numero di abitanti. Una possibile rappresentazione di questa classificazione sarebbe una tabella a doppia entrata in cui ogni colonna corrispondesse ad un certo intervallo di aree del tetto e in cui ogni riga corrispondesse ad un intervallo di abitanti, come l'esempio della tab. 1: in questo modo ogni cella conterrebbe la quantità q_{ij} di edifici presenti in una particolare zona X della città che possiedono un certo numero di interni e una certa area del tetto.

Zona X	**Area del tetto (m²)**				
Abitanti	**15-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**…**
1-2	q_{11}	q_{12}	q_{13}	q_{14}	
3-5	q_{21}	q_{22}	q_{23}	q_{24}	
6-8	q_{31}	q_{32}	q_{33}		
9-11	q_{41}	q_{42}			
12-14	q_{51}				
…					

Tab. 1: *classificazione ottimale degli edifici (auspicata)*

Dividendo tutte le quantità per la loro somma si ricaverebbero le frequenze relative o percentuali e quindi si potrebbe stabilire quali categorie ritenere più diffuse e da queste estrarre il proprio edificio rappresentativo. Purtroppo questa classificazione non è stata rintracciata e quindi si è dovuta seguire un'altra strada, come verrà spiegato nel successivo paragrafo.

3.1.1 Dati a disposizione: il Censimento ISTAT

Per poter disporre di una classificazione degli edifici che si avvicini a quella desiderata, un utile strumento è il censimento della popolazione e delle abitazioni del 2011 [9], fatto dall'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), che ha prodotto come risultati alcune statistiche relative ai tipi di edifici residenziali e alla popolazione che verranno utilizzate nel presente lavoro. Tali statistiche sono fatte a diverse scale: regionale, provinciale, comunale. Alla scala comunale, si distinguono i "Grandi comuni" dai restanti: per essi esiste una partizione ad una scala ancora più piccola, la cosiddetta "*area sub comunale*" che in seguito verrà spesso abbreviata con l'acronimo "ASC"; a seconda del comune, le ASC possono coincidere con una suddivisione amministrativa o essere un aggregato di esse. Nel caso di Torino queste *aree* sono un aggregato di quartieri, come indicato in tab. 2 e fig. 11.

Identificativo	Nome *area sub comunale*
A	Centro, Crocetta
B	Santa Rita, Mirafiori nord
C	San Paolo, Cenisia, Cit Turin, Pozzo Strada
D	San Donato, Parella, Campidoglio
E	Borgo Vittoria, Madonna di Campagna, Lanzo, Lucento, Le Vallette
F	Regio Parco, Barca, Bertolla, Barriera di Milano, Rebaudengo, Falchera, Villaretto
G	Aurora, Vanchiglia, Sassi, Madonna del Pilone
H	Borgo Po, San Salvario, Cavoretto
L	Nizza Millefonti, Lingotto, Filadelfia
M	Mirafiori sud

Tab. 2: *composizione delle aree sub comunali della città di Torino*

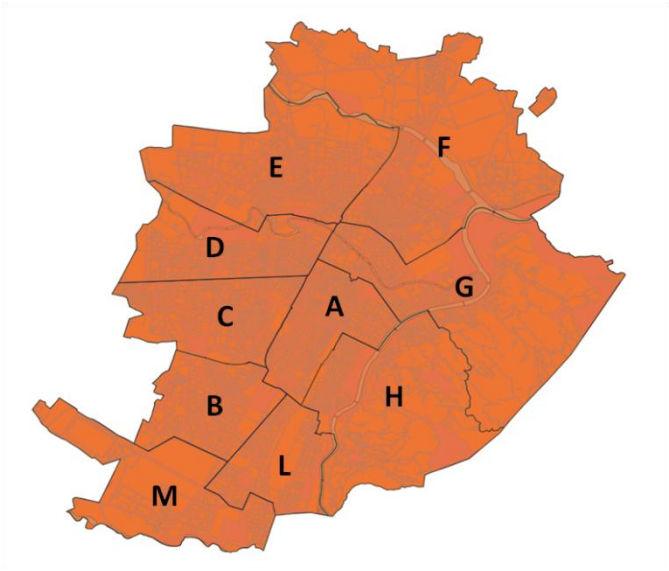


Fig. 11: *carta catastale di Torino con i confini delle aree sub comunali e le lettere che le identificano (fonti ISTAT e Geoportale del comune di Torino)*

Tra i parametri che sono presi in considerazione per classificare gli edifici residenziali figurano il *numero di interni* ed il *numero di piani*, mentre l'area del tetto non viene presa in considerazione.
Per ogni area sub comunale del "Grande comune" l'ISTAT fornisce quindi i seguenti valori:

1. classificazione degli edifici secondo il numero di interni, ossia la quantità q_i di edifici per ognuna delle classi della tab. 3
2. classificazione degli edifici secondo il numero di piani, simile alla precedente e con le classi della tab. 4
3. popolazione residente
4. numero di famiglie

Descrizione	Quantità q_k (numero di edifici)
16 interni o più	q_1
tra i 9 ed i 15 interni	q_2
tra i 5 e gli 8 interni	q_3
3 o 4 interni	q_4
2 interni	q_5
1 interno	q_6

Tab. 3: *statistica relativa agli edifici classificati per numero di interni*

Un'ulteriore utile statistica fornita per i "Grandi comuni", questa volta però fornita alla sola scala comunale, è quella che considera contemporaneamente i due parametri del numero di interni e del numero di piani degli edifici residenziali, in modo da poter conoscere la quantità di edifici per ogni combinazione di piani e di interni, come viene illustrato nella tab. 4.

		N piani			
classe	**N interni**	**1**	**2**	**3**	**4 o più**
6	**1**	1745	1998	333	51
5	**2**	699	2248	545	83
4	**3-4**	383	1997	1259	482
3	**Tra 5 e 8**	234	916	1455	2978
2	**Tra 9 e 15**	108	162	658	6790
1	**Almeno 16**	48	47	196	10743

Tab. 4: *quantità degli edifici residenziali di Torino, classificati secondo il numero di piani e di interni*

La quantità totale di edifici della città di Torino è pari a 36158 unità, somma di tutte le quantità presenti nella tab. 4.

3.1.2 Determinazione degli edifici rappresentativi

Come si è visto le statistiche dell'ISTAT possono essere d'aiuto ma non sono esaustive, come ad esempio riguardo le aree dei tetti, che non vengono considerate. Tuttavia, non disponendo di database più completi, si è deciso di basarsi comunque su di esse, poiché forniscono dati alla scala sub comunale. Per la suddivisione del territorio cittadino in zone verrà quindi utilizzata la partizione in aree sub comunali.
Come già detto, le caratteristiche salienti dell'edificio rappresentativo sono:

- numero di abitanti
- area del tetto

Sintesi del metodo per la determinazione degli edifici rappresentativi

Il metodo di scelta degli edifici rappresentativi che si è deciso di mettere in atto prevede di utilizzare come dato statistico la classificazione per numero di *interni*, termine che in questo lavoro è identificato con gli appartamenti, così da avere un edificio rappresentativo per ogni classe di interni, cioè, in totale, sei edifici per ogni area sub comunale, che saranno gli stessi per tutta la città. L'edificio rappresentativo di una classe avrà un numero di interni vicino a quello centrale di tale classe; per scegliere il numero di interni dell'edificio rappresentativo

della classe superiormente illimitata ("almeno sedici interni") verrà introdotto il vincolo di conservazione della popolazione.
Per stabilire il numero di abitanti del generico edificio rappresentativo, si suppone che ogni interno sia abitato da un numero di persone pari alla *famiglia media* dell'area sub comunale considerata.
Per stabilirne l'area del tetto è d'aiuto la classificazione comunale basata contemporaneamente sui due parametri dei piani e degli interni: tale statistica consente di stabilire quale sia, all'interno di ogni classe, il numero di piani più frequente, che viene quindi attribuito all'edificio rappresentativo della corrispondente classe. In questo modo si è stabilita la *forma* dell'edificio (la coppia di valori piani-interni): a questo punto, mediante Google Maps-Street View si individua un edificio nel territorio cittadino che corrisponda a tale forma e se ne misura l'area mediante la carta catastale. Tale area viene assunta come area del tetto dell'edificio. Di seguito viene spiegata nel dettaglio la procedura.

Occupanti

In questa tesi si utilizza la parola "interno" come sinonimo di "appartamento": è un'assunzione, in quanto gli interni possono essere anche di tipo commerciale, mentre in questa sede l'oggetto di studio sono gli edifici residenziali o, comunque, la parte residenziale degli edifici qualora una parte di essi sia dedicata ad altre attività, come ad esempio il commercio.
Il procedimento che si sceglie di intraprendere per calcolare il numero di occupanti dell'edificio, seguendo l'articolo scientifico [5], è quello di assegnare ad ogni alloggio la *famiglia media* dell'ASC a cui l'edificio appartiene, definita nel modo seguente:

$$famiglia\ media = \frac{n°\ abitanti\ ASC}{n°\ famiglie\ ASC} \tag{3.1}$$

La popolazione dell'edificio è la somma degli abitanti di ogni appartamento approssimata all'intero, ossia:

$$n°\ occupanti_k = famiglia\ media\ \cdot n°\ appartamenti_k \tag{3.2}$$

Per quanto riguarda il numero di appartamenti, l'ISTAT, come si è detto, fornisce le quantità di edifici q_k classificati per numero di interni (appartamenti), come nella tab. 3. Nella seguente tabella vengono numerate le classi.

Classe	Descrizione	Quantità q_k (numero di edifici)
1	16 interni o più	q_1
2	tra i 9 ed i 15 interni	q_2
3	tra i 5 e gli 8 interni	q_3
4	3 o 4 interni	q_4
5	2 interni	q_5
6	1 interno	q_6

Tab. 5: *classificazione Istat degli edifici residenziali secondo il numero di interni*

Come si vede nella tab. 5, le classi non sono univoche poiché ad ognuna non corrisponde un unico valore di interni e inoltre la classe 1 non è neppure limitata; tuttavia, si è deciso di

basarsi su questa classificazione e viene scelto un valore di interni da associare ad ogni classe limitata. Tale numero deve essere vicino al valore centrale dell'intervallo della classe (tab. 6).

Classe	numero di appartamenti
2	12
3	6
4	3
5	2
6	1

Tab. 6: *assegnazione del numero di appartamenti ad ogni classe limitata*

Per conoscere il numero di abitanti dell'edificio di classe 1, che non ha un limite superiore in fatto di interni, si è deciso di fissare un vincolo, ossia di far sì che il modello di area sub comunale che si sta costruendo porti ad una *popolazione totale* pari a quella *reale*, ovvero che nel passaggio tra realtà dell'area sub comunale e il modello della stessa si conservi il numero di abitanti. Si noti come la conservazione della popolazione dell'ASC comporti un valore della domanda d'acqua complessiva dell'ASC uguale a quello che si verifica nella realtà.
Dall'imposizione di questo vincolo e dal calcolo degli abitanti delle altre classi di edifici si ottengono gli abitanti che deve contenere l'edificio rappresentativo della classe 1.
La popolazione di una generica classe di edifici limitata si calcola moltiplicando il numero di edifici appartenenti a tale classe per la popolazione del suo edificio rappresentativo: per fare ciò è necessario calcolare la frequenza relativa (o percentuale) f_k di ogni classe, poiché nel seguito verranno considerate solo le classi che superano la soglia del 10% di frequenza:

$$f_k = \frac{q_k}{n° \; edifici} \tag{3.3}$$

dove:
$n° \; edifici$ è il numero di edifici residenziali dell'ASC, ossia la somma delle q_k delle sei classi.
Una volta eliminate le classi con f_k inferiore al 10%, si normalizzano le frequenze delle K^* classi rimanenti rispetto alla loro somma:

$$f_k^{norm} = \frac{f_k}{\sum_{k=1}^{K^*} f_k} \tag{3.4}$$

Gli edifici vengono ridistribuiti secondo le f_k^{norm} e si ottiene la popolazione relativa alla classe k:

$$pop_classe_k = n° \; occupanti_k \cdot f_k^{norm} \cdot n° \; edifici \tag{3.5}$$

Per la classe 1, qualora debba essere presa in considerazione poiché supera la soglia, questo calcolo ovviamente non si può svolgere, non conoscendo il termine $appartamenti_1$ e quindi anche il conseguente $occupanti_1$, ma imponendo la conservazione della popolazione si può ricavare per differeza la popolazione della classe 1:

$$pop_classe_1 = pop_{reale} - \sum_{k=2}^{K^*} pop_classe_k \tag{3.6}$$

dove pop_{reale} è la popolazione reale dell'ASC, fornita dall'ISTAT.
In pratica però si opera in modo inverso: si impone un valore intero di $n° \; occupanti_1$ tale che il prodotto:

$$n° \; occupanti_1 \cdot f_1^{norm} \cdot n° \; edifici$$

si avvicini il più possibile al valore:

$$pop_{reale} - \sum_{k=2}^{K^*} pop_classe_k$$

La sola conseguenza è che la popolazione dell'area sub comunale del modello e la popolazione reale differiscono di un piccolo errore, in modulo inferiore all'1% rispetto alla popolazione reale.
In questo modo si è trovato il valore di occupanti che deve avere l'edificio rappresentativo della classe 1. Il passaggio al numero di interni è semplicemente dato dal rapporto tra la quantità di occupanti e il valore della famiglia media dell'ASC e non sarebbe indispensabile, poiché gli interni non sono un parametro necessario alla simulazione, tuttavia esso è comunque d'aiuto per stabilire l'altro parametro fondamentale, ossia l'area del tetto.

Area del tetto

L'area del tetto degli edifici non si trova tra i dati statistici, come neppure l'area di base, alla quale si potrebbe correlare agevolmente l'area del tetto senza probabilmente commettere grandi errori.
È tuttavia possibile misurare l'area di qualsiasi edificio della città sulla carta catastale fornita in forma digitale dal Geoportale del comune di Torino [11] mediante il programma QGis.
Il procedimento che si è deciso di seguire prevede di stabilire preventivamente la forma dell'edificio rappresentativo, ossia, oltre al già noto numero di appartamenti, anche il numero di piani; successivamente, per mezzo di Google Maps – Street View si individua sul territorio cittadino un edificio reale che risponda alla forma desiderata e se ne misura l'area sulla carta catastale mediante il programma QGis: questa area sarà assunta, senza modifiche, come area del tetto dell'edificio rappresentativo.
Per stabilire la forma dell'edificio si considera la distribuzione a scala comunale degli edifici in base ai piani e agli interni a cui si è fatto riferimento nel paragrafo 3.1.1, dividendo ogni quantità della tab. 4 per il numero totale di edifici della città, al fine di ottenere le frequenze percentuali (tab. 7). In questo modo si può quindi stabilire quale sia la forma di edificio più diffusa a scala cittadina per ogni classe k, come viene evidenziato nella stessa tab. 7, dove si vede che per le classi 4, 5 e 6 è immediato stabilire quale sia la forma più diffusa, mentre per le classi 1, 2 e 3 esiste un'ambiguità: gli edifici più diffusi di tali classi sono caratterizzati dall'avere un numero di piani almeno pari a 4, ma senza un limite superiore, perciò non si può stabilire con questi soli dati la forma dell'edificio. Si ricorda che per la classe 1 il numero di interni può essere stabilito a seguito del calcolo degli occupanti, quindi non è un'incognita.

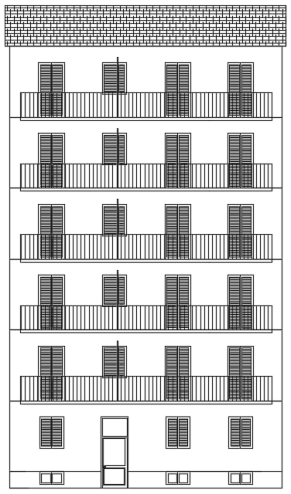
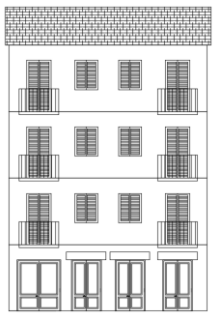
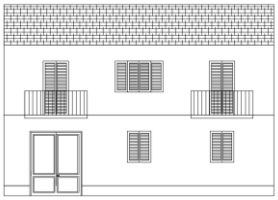
	Numero di piani				**Forma più diffusa**
classe	1	2	3	4 o più	
6	5	6	1	0	1 interno e due piani
5	2	6	2	0	2 interni e 2 piani
4	1	6	3	1	3 interni e 2 piani
3	1	3	4	8	6 interni e almeno 4 piani
2	0	0	2	19	12 interni e almeno 4 piani
1	0	0	1	30	Almeno 16 interni e almeno 4 piani

Tab. 7: *frequenze percentuali degli edifici residenziali di Torino, classificati secondo il numero di piani e interni (frequenze approssimate all'intero)*

Per risolvere il problema dell'ambiguità, si fa un'ipotesi che è sufficientemente realistica nelle aree sub comunali dove prevalgono gli edifici di recente costruzione (in calcestruzzo armato, Secondo dopoguerra): si suppone che l'edificio rappresentativo abbia due o tre appartamenti per piano. Questo permette di stabilire il numero di piani, pari a:

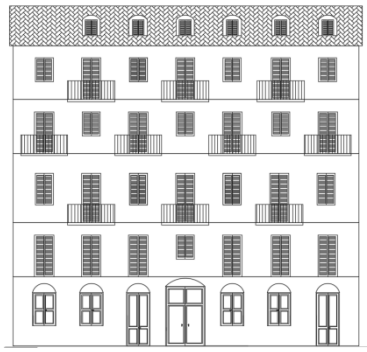
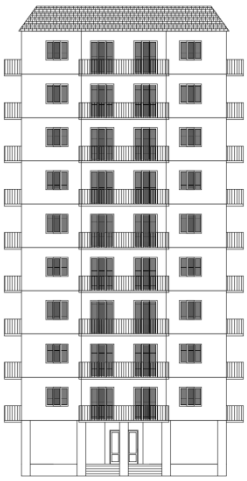
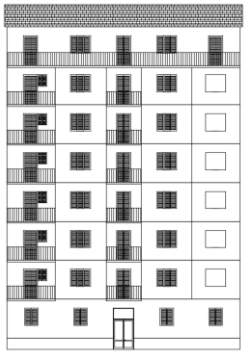
$$piani = \frac{n° \; appartamenti}{2} \; oppure \; \frac{n° \; appartamenti}{3}$$

Invece, nelle ASC dove gli edifici prevalenti sono più vecchi, non sono costruiti in calcestruzzo armato e quindi le altezze sono limitate a circa 5-6 piani, l'ipotesi di avere due o tre appartamenti per piano è valida solo per le classi 2 e 3, poiché la classe 1 richiederebbe un edificio rappresentativo di almeno 6 piani, ma spesso anche molto superiore: ad esempio, nell'area sub comunale F, il numero di appartamenti associato dell'edificio di classe 1 è pari a 27, valore che comporterebbe un edificio alto tra i 9 e i 14 piani, vale a dire un tipo di edificio praticamente assente in quel territorio. In queste aree sub comunali sono invece molto diffuse le case "di ringhiera" o comunque gli edifici di grande estensione in pianta, con un cortile intorno al quale sono disposti i fabbricati, che fanno capo ad un'unica entrata sulla strada pubblica, solitamente un portone che permette l'accesso al cortile: questi tipi di edificio sono alti tra i 3 ed i 5 piani e sono muniti di una scala che porta ai ballatoi che attorniano il cortile, attraverso i quali si accede a ogni appartamento, in modo che ciascun piano può contenere molti appartamenti, mediamente 7-8.
Un controllo utile e spesso facile da attuare mediante Street View, riguarda la possibilità di contare i bottoni dei citofoni degli edifici, che devono essere in numero uguale, almeno approssimativamente, alla quantità di appartamenti dell'edificio in esame.
La ricerca ha portato a definire cinque edifici rappresentativi, uno per ogni classi dalla 2 alla 6 e quatto tipi di edificio rappresentativo possibili per la classe 1, scelti di volta in volta in base al numero di occupanti di tale classe.
L'insieme degli edifici rappresentativi delle classi dalla 2 alla 6 è contenuto nella tab. 8, mentre i quattro tipi di edificio possibili per la classe 1 sono descritti nella tab. 9; il nome che li identifica è "tipo *k*" o "tipo *kx*" dove *k* è l'indice della classe e *x* è la lettera che identifica la forma, quest'ultima nel solo caso degli edifici di classe 1.

	Tipo 2	Tipo 3
		
piani fuori terra	6	4
piani residenziali	6	3
appartamenti per piano	2	2
Totale appartamenti	12	6
Area tetto (m²)	155	148
	Tipo 4	**Tipo 5**
		
piani fuori terra	2	2
piani residenziali	2	2
appartamenti per piano	2 (1 al piano terra)	1
Totale appartamenti	3	2
Area tetto (m²)	160	117
	Tipo 6	
piani fuori terra	2	
piani residenziali	2	
appartamenti per piano	-	
Totale appartamenti	1	
Area tetto (m²)	82	

Tab. 8:*edifici rappresentativi delle classi 2-6*

L'edificio rappresentativo della classe 1 viene scelto tra quelli dell'insieme della tab. 9, in base al numero di interni derivante dal calcolo di conservazione della popolazione dell'ASC e in base all'epoca di edificazione dell'area, utilizzando i tipi A o B per le zone antiche e i tipi C o D per quelle recenti: in particolare il tipo A è una casa borghese a corte interna, mentre il tipo B è una tipica casa popolare "di ringhiera"; entrambe sono dotate di cortile interno su cui si affacciano i ballatoi che conducono agli appartamenti.

	Tipo 1A	**Tipo 1B**
		
piani fuori terra	5 + sottotetto	5
piani residenziali	5	4
appartamenti per piano	-	-
Totale appartamenti	18	27
Area tetto (m²)	385	420
	Tipo 1C	**Tipo 1D**
		
piani fuori terra	10	8
piani residenziali	9	8
appartamenti per piano	3	2
Totale appartamenti	27	16
Area tetto (m²)	230	230

Tab. 9: *possibili edifici rappresentativi della classe 1*

3.1.3 Assegnazione degli edifici alle aree sub comunali

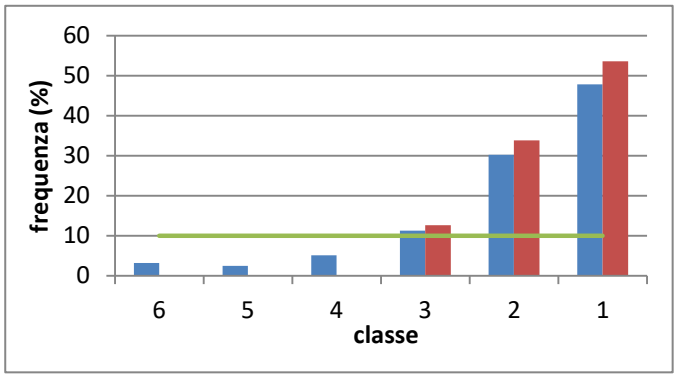
Definito l'insieme degli edifici rappresentativi, si passa ora ad analizzare ogni area sub comunale: si individuano le classi che superano la soglia del 10% e si calcola per ogni edificio il proprio numero di occupanti teorico con la formula (3.2), valore che è riportato con due cifre decimali alla voce Popolazione delle tabelle che seguiranno. A fianco di tale numero, per i tipi dal 2 al 6 ne viene riportata l'approssimazione all'intero che viene utilizzata per calcolare la domanda idrica; per il tipo 1 invece il numero tra parentesi è il valore di popolazione risultante dall'imposizione del vincolo di conservazione della popolazione, usato anch'esso successivamente per il calcolo della domanda idrica.

ASC A

L'ASC A è composta dai quartieri Centro e Crocetta.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
75966	40629	1.87

	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	98	77	158	350	940	1487	3110



Classi che superano la soglia		
classe	f_k^{norm} (%)	Quantità edifici
1	53,6	1665
2	33,9	1053
3	12,6	392

Fig. 12: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale A (in blu) e frequenze normalizzate f_k^{norm} rispetto alla somma di quelle che superano la soglia del 10% (in rosso). La tabella mostra il valore di f_k^{norm} e la quantità di edifici corrispondente.*

Le classi che superano la soglia del 10% sono solo le 1, 2 e 3. L'are sub comunale A è costituita dal quartiere Centro, di antica costruzione e dal quartiere Crocetta, edificato in parte già nel '700-'800. Come si vede in fig. 12 e ricordando la caratteristica minima dell'edificio rappresentativo di classe 1 di avere almeno quattro piani, quasi il 50% degli edifici dell'ASC A devono avere almeno sedici appartamenti e almeno quattro piani: una ricognizione virtuale, mediante Google Maps, permette di rendersi conto che la maggior parte degli edifici dell'area non supera i 5-6 piani e allo stesso tempo sono molto diffuse le case con cortile interno e ballatoi, di un tipo più ricco rispetto a quelle di alcuni quartieri esterni al centro storico. Per questo motivo viene scelto l'edificio di tipo 1A.

Tipo di edificio	1A	2	3
Frequenza norm. (%)	53,6	33,9	12,6
Area tetto (m²)	385	155	148
Popolazione	33,66 (29)	22,44 (22)	11,22 (11)

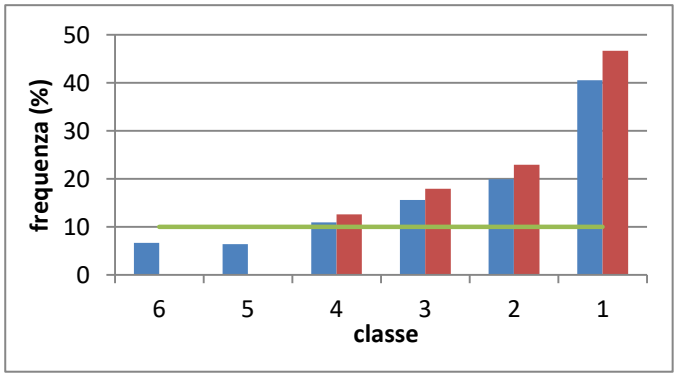
Tab. 10: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale A*

ASC B

L'ASC B è composta dai quartieri Santa Rita e Mirafiori Nord.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
100574	49002	2.05

	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	185	176	303	431	551	1122	2768



Classi che superano la soglia		
classe	f_k^{norm} (%)	Quantità edifici
1	46,6	1290
2	22,9	634
3	17,9	496
4	12,6	348

Fig. 13: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale B (in blu) e frequenze normalizzate f_k^{norm} rispetto alla somma di quelle che superano la soglia del 10% (in rosso). La tabella mostra il valore di f_k^{norm} e la quantità di edifici corrispondente.*

Le classi che superano la soglia del 10% sono solo le prime quattro. L'ASC B è stata principalmente edificata nel Secondo dopoguerra ed è pertanto ricca di edifici costruiti in calcestruzzo armato di notevole altezza (fino a 10 piani circa). Per la classe 1 si è scelto quindi l'edificio di tipo 1C.

	Tipo 1C	Tipo2	Tipo 3	Tipo 4
Frequenza norm. (%)	46,6	22,9	17,9	12,6
Area tetto (m²)	230	155	148	160
Popolazione	55,35 (59)	24,60 (25)	12,30 (12)	6,15 (6)

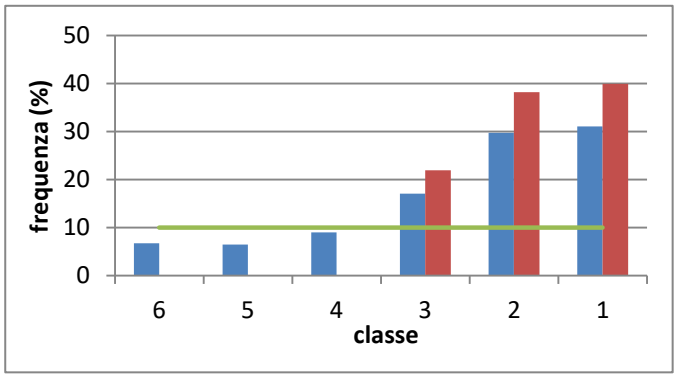
Tab. 11: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale B*

ASC C

L'ASC è composta dai quartieri San Paolo, Cenisia, Cit Turin e Pozzo Strada.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
127187	62712	2.03

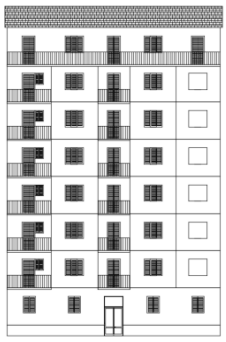
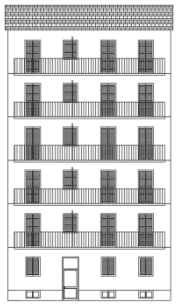
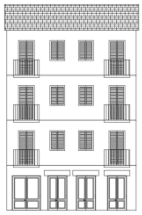
	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	347	333	462	878	1527	1597	5144



Classi che superano la soglia		
classe	f_k^{norm} (%)	Quantità edifici
1	39,9	2053
2	38,2	1963
3	21,9	1128

Fig. 14: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale C (in blu) e frequenze normalizzate f_k^{norm} rispetto alla somma di quelle che superano la soglia del 10% (in rosso). La tabella mostra il valore di f_k^{norm} e la quantità di edifici corrispondente.*

Le classi che superano la soglia sono le prime tre. Nell'ASC C sono abbastanza diffusi gli edifici del Secondo dopoguerra, quindi per la classe 1 si sceglie il tipo D.

	Tipo 1D	Tipo2	Tipo 3
Frequenza norm. (%) (%)	39,9	38,2	21,9
Area tetto (m²)	230	155	148
Popolazione	32.48 (32)	24.36 (24)	12.18 (12)
			

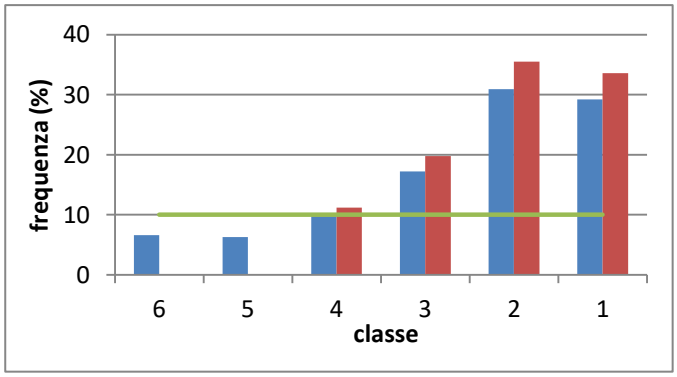
Tab. 12: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale C*

ASC D

L'ASC D è composta dai quartieri San Donato, Parella e Campidoglio.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
95238	46515	2.05

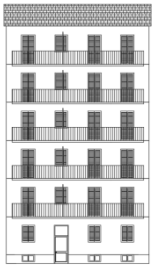
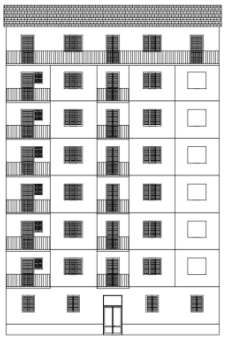
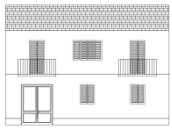
	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	278	265	409	724	1299	1228	4203



Classi che superano la soglia		
classe	f_k^{norm} (%)	Quantità edifici
1	33,6	1410
2	35,5	1492
3	19,8	831
4	11,2	470

Fig. 15: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale D (in blu) e frequenze normalizzate f_k^{norm} rispetto alla somma di quelle che superano la soglia del 10% (in rosso). La tabella mostra il valore di f_k^{norm} e la quantità di edifici corrispondente.*

Le classi che superano la soglia del 10% sono le prime tre; tuttavia la frequenza della classe 4 è molto vicina al valore limite, quindi viene anch'essa considerata. Come per la precedente ASC C, anche nell'area sub comunale D si può scegliere per la classe 1 l'edificio di tipo 1D.

	Tipo2	Tipo 1D	Tipo 3	Tipo 4
Frequenza norm. (%)	35,5	33,6	19,8	11,2
Area tetto (m^2)	155	230	148	160
Popolazione	24,60 (25)	32,80 (32)	12,30 (12)	6,15 (6)
				

Tab. 13: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale D*

ASC E

L'ASC E è composta dai quartieri Borgo Vittoria, Madonna di Campagna, Lanzo, Lucento e Le Vallette.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
121608	55189	2.20

	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	530	466	548	816	831	1261	4452

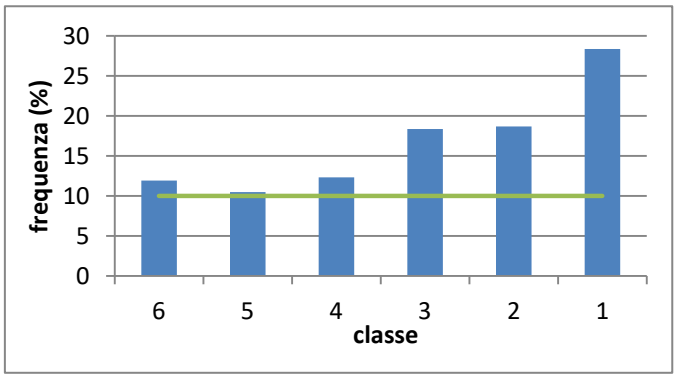
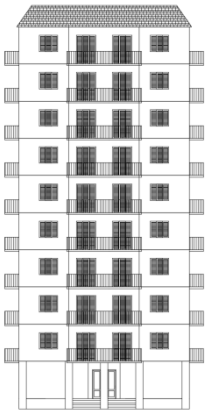
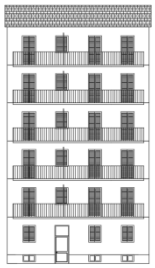
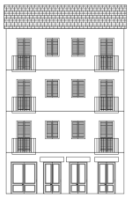
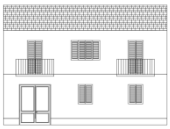
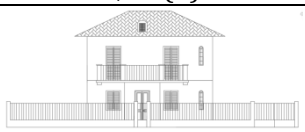


Fig. 16: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale E*

Tutte le classi superano la soglia e quindi devono essere considerati tutti i tipi di edificio. L'ASC E è mediamente di recente costruzione, quindi per la classe 1 si sceglie l'edificio tipo C.

	Tipo 1C	Tipo2	Tipo 3	Tipo 4
Frequenza norm. (%)	28,3	18,7	18,3	12,3
Area tetto (m²)	230	155	148	160
Popolazione	59,40 (65)	26,40 (26)	13,20 (13)	6,60 (7)
				

	Tipo 6	Tipo 5
Frequenza norm. (%)	11,9	10,5
Area tetto (m²)	82	117
Popolazione	2,20 (2)	4,40 (4)
		

Tab. 14: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale E*

ASC F

L'ASC F è composta dai quartieri Regio Parco, Barca, Bertolla, Barriera di Milano, Rebaudengo, Falchera e Villaretto.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
102188	45868	2.23

	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	712	580	672	822	745	1137	4668

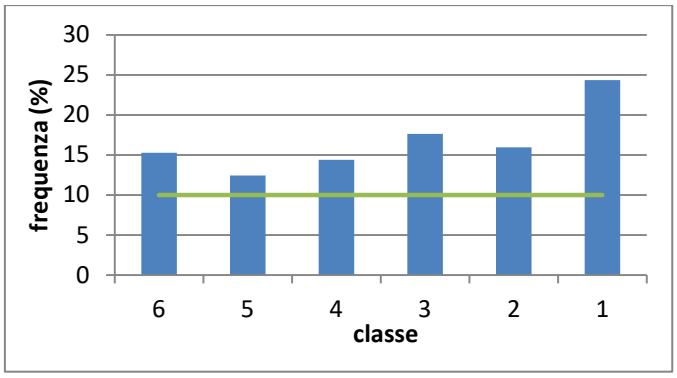
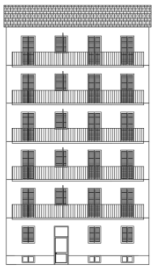
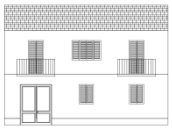


Fig. 17: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale F*

Tutte le classi superano la soglia e quindi devono essere considerati tutti i tipi di edificio. Questa area sub comunale è abbastanza eterogenea: i quartieri Barca e Bertolla ed il piccolissimo Villaretto hanno delle caratteristiche edilizie molto simili a quelle dei piccoli centri, con case che generalmente non superano i due piani, mentre altri quartieri (Regio Parco, Falchera, Rebaudengo) mostrano anche edifici recenti di notevole altezza, che tuttavia si ritengono essere troppo pochi per giustificare la scelta di un edificio di classe 1 tra i tipi C o D; infatti, soprattutto nel popolare quartiere di Barriera di Milano, edificato in modo fitto rispetto agli altri di questa ASC, sono molto diffuse le case "di ringhiera", simili al tipo 1B, che viene pertanto assunto come rappresentativo della classe 1.

	Tipo 1B	Tipo 3	Tipo2	Tipo 6
Frequenza norm. (%)	24,4	17,6	16,0	15,3
Area tetto (m²)	420	148	155	82
Popolazione	60,21 (56)	13,38 (13)	26,76 (27)	2,23 (2)
				

	Tipo 4	Tipo 5
Frequenza norm. (%)	14,4	12,4
Area tetto (m²)	160	117
Popolazione	6,69 (7)	4,46 (4)
		

Tab. 15: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale F*

ASC G

L'ASC è composta dai quartieri Aurora, Vanchiglia, Sassi e Madonna del Pilone.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
83381	39908	2.09

	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	560	641	638	650	772	1155	4416

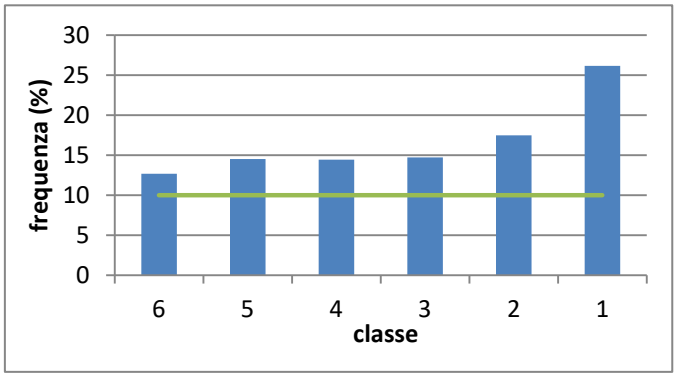
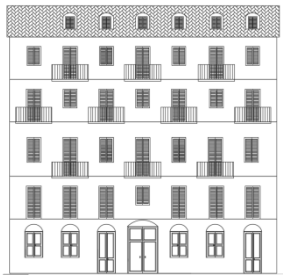
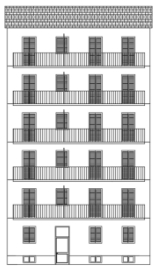
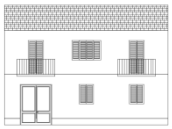


Fig. 18: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale G*

Tutte le classi superano la soglia e quindi devono essere considerati tutti i tipi di edificio. L'ASC G, assieme alla H, sono le due che comprendono il territorio collinare della città (Sassi, Madonna del Pilone), porzione che, come si è descritto all'inizio del capitolo 3, presenta molte case mono o bifamiliari e una densità di edifici molto inferiore a quella della parte di pianura. Ciononostante, la densità di edifici dei quartieri di pianura ha un notevole impatto sulla statistica, quindi in essa prevalgono comunque gli edifici di classe 1. In particolare, data l'anzianità dei quartieri di pianura (Aurora e Vanchiglia) e i risultati dovuti alla *conservazione della popolazione*, si sceglie un edificio rappresentativo di tipo A.

	Tipo 1A	Tipo2	Tipo 3	Tipo 5
Frequenza norm. (%)	26,2	17,5	14,7	14,5
Area tetto (m^2)	385	155	148	117
Popolazione	37,62 (42)	25,08 (25)	12,54 (13)	4,18 (4)
				

	Tipo 4	Tipo 6
Frequenza norm. (%)	14,5	12,7
Area tetto (m²)	160	82
Popolazione	6,27 (6)	2,09 (2)
		

Tab. 16: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale G*

ASC H

L'ASC H è composta dai quartieri Borgo Po, San Salvario, Cavoretto.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
55109	27392	2.01

	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	1079	792	680	535	492	733	4311

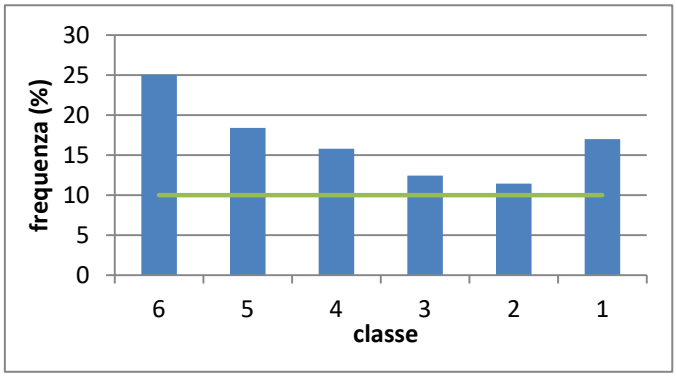
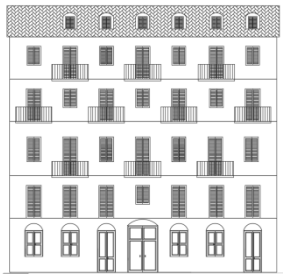
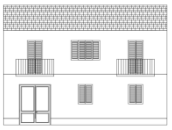
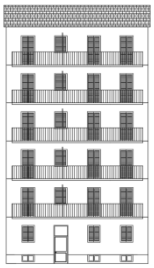


Fig. 19: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale H*

Tutte le classi superano la soglia e quindi devono essere considerati tutti i tipi di edificio. I quartieri Borgo Po e Cavoretto appartengono al territorio collinare, che mostra come si è detto una spiccata prevalenza di case basse, spesso monofamiliari. San Salvario è invece un quartiere della zona di pianura, edificato prevalentemente prima del Novecento. La statistica questa volta risente soprattutto delle caratteristiche dei quartieri collinari, infatti la classe più numerosa è la 6. Tuttavia anche la classe 1, a cui appartiene buona parte degli edifici di San Salvario, spicca tra le altre. L'edificio tipo A, scelto per la classe 1, è diffuso soprattutto nel quartiere di San Salvario.

	Tipo 6	Tipo 5	Tipo 1A	Tipo 4
Frequenza norm. (%)	25,0	18,4	17,0	15,8
Area tetto (m²)	82	117	385	160
Popolazione	2,01 (2)	4,02 (4)	36,18 (38)	6,0 (6)
				

	Tipo 3	Tipo2
Frequenza norm. (%)	12,4	11,4
Area tetto (m²)	148	155
Popolazione	12,06 (12)	24,12 (24)
		

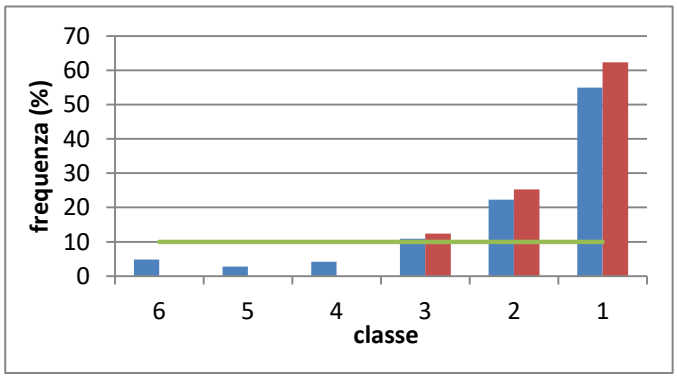
Tab. 17: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale H*

ASC L

L'ASC L è composta dai quartieri Nizza Millefonti, Lingotto e Filadelfia.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
73095	35330	2.07

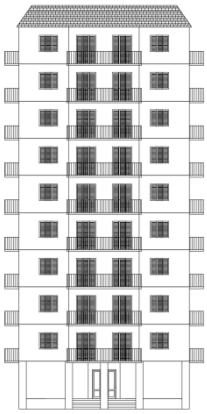
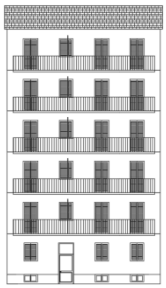
	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	84	49	73	191	390	960	1747



Classi che superano la soglia		
classe	f_k^{norm} (%)	Quantità edifici
1	62,3	1088
2	25,3	442
3	12,4	217

Fig. 20: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale L (in blu) e frequenze normalizzate f_k^{norm} rispetto alla somma di quelle che superano la soglia del 10% (in rosso). La tabella mostra il valore di f_k^{norm} e la quantità di edifici corrispondente.*

Le classi che superano la soglia sono le prime tre. Come si vede in fig. 20 la classe più diffusa è la 1, che in questa ASC è rappresentata da edifici costruiti nel Secondo dopoguerra: la scelta ricade quindi sul tipo 1C.

	Tipo 1C	Tipo2	Tipo 3
Frequenza norm. (%)	62,3	25,3	12,4
Area tetto (m²)	230	155	148
Popolazione	55,89 (55)	24,84 (25)	12,42 (12)
			

Tab. 18: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale L*

ASC M

L'ASC M coincide col quartiere Mirafiori Sud.
Dati relativi alla popolazione:

Popolazione (abitanti)	Numero di famiglie	Famiglia media (abitanti per famiglia)
38021	16904	2.25

	Classificazione degli edifici residenziali						totale
	6	5	4	3	2	1	
Quantità di edifici	254	196	178	186	171	354	1339

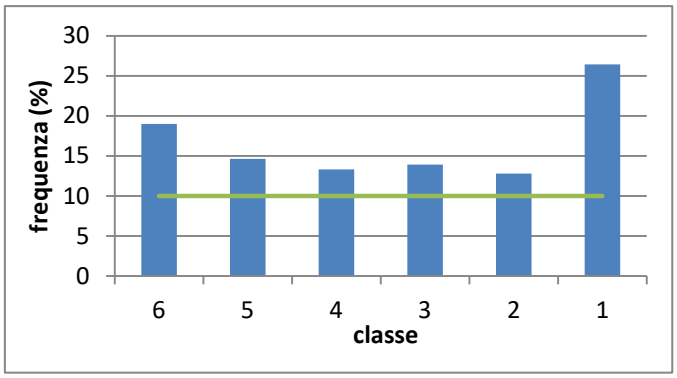
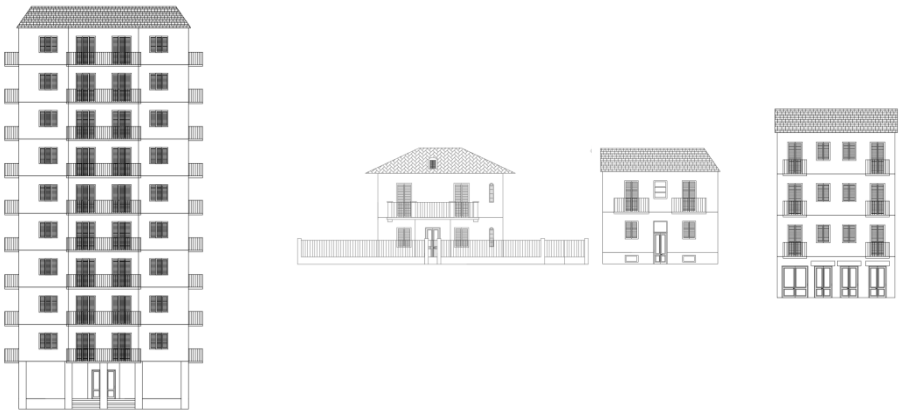
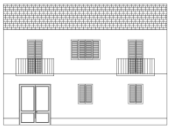
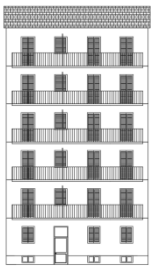


Fig. 21: *frequenze percentuali degli edifici dell'area sub comunale M*

Tutte le classi superano la soglia e quindi devono essere considerati tutti i tipi di edificio. L'area sub comunale M è stata edificata prevalentemente nel Secondo dopoguerra, quindi per la classe 1 si sceglie il tipo C; inoltre, data la grande dimensione della famiglia media, si ipotizza che nell'edificio di tipo 1C abitino in media poco meno di tre persone, ossia un numero notevolmente superiore alla media, come si può vedere dalla differenza tra la popolazione teorica e il numero tra parentesi tonde.

	Tipo 1C	Tipo 6	Tipo 5	Tipo 3
Frequenza norm. (%)	26,4	19,0	14,6	13,9
Area tetto (m^2)	230	82	117	148
Popolazione	60,75 (79)	2,25 (2)	4,50 (5)	13,50 (14)



	Tipo 4	Tipo2
Frequenza norm. (%)	13,3	12,8
Area tetto (m^2)	160	155
Popolazione	6,75 (7)	27,00 (27)
		

Tab. 19: *edifici rappresentativi dell'area sub comunale M*

3.2 Domanda d'acqua non potabile pro capite

La simulazione del funzionamento del serbatoio necessita di conoscere il volume d'acqua per usi non potabili consumato dall'edificio quotidianamente: esso è la somma dei volumi usati da ognuno degli occupanti dell'edificio. Il volume consumato quotidianamente dal singolo occupante, ossia la *domanda pro capite non potabile giornaliera,* viene indicato con la lettera *d* ed è espresso in m^3 / giorno / abitante oppure in litri / giorno / abitante: questo valore ovviamente varia da persona a persona e da un giorno ad un altro. L'obiettivo sarebbe quindi quello di individuare un valore medio per persona che valga per tutta la città. Questo valore non è però facilmente individuabile, non essendo presente tra i dati statistici forniti dall'ISTAT. Conviene quindi trovare un modo per riferirsi quantomeno alla domanda di acqua potabile, poiché ciò che è sicuro è che la domanda non potabile *d* è una frazione del volume totale di acqua che ogni abitante consuma quotidianamente: viene adottato il criterio dello studio pubblicato nell'articolo scientifico [5], svolto sulla città di Lisbona, che ha stabilito come la domanda non potabile sia circa pari al 28% della domanda totale.
L'unico dato riguardante la domanda d'acqua potabile rintracciabile sul sito dell'ISTAT è il volume fatturato, ossia il volume d'acqua che viene complessivamente consumato in un anno da tutte le utenze di un comune collegate all'acquedotto. Da questo valore, si potrebbe ricavare la domanda media giornaliera su base annua (dotazione), che è per definizione un valore costante nell'arco dell'anno, tuttavia bisogna prestare attenzione al fatto che il volume fatturato è il volume consegnato a *tutte* le utenze collegate all'acquedotto, comprese quelle relative alle attività commerciali, agli ospedali, alle piccole manifatture che non abbiano un proprio approvvigionamento, ecc. Inoltre le città ospitano quotidianamente molte persone che non le abitano ma che consumano acqua e che quindi ne fanno crescere i consumi totali.
Ne deriva che la dotazione aumenta coll'aumentare della grandezza della città: a Torino risulta essere di circa 290 litri/giorno/abitante (elaborazione su dati Istat, [12]), molto più grande dei comuni più piccoli della medesima area geografica. Dato che l'intento di questa tesi è di analizzare il risparmio idrico nelle abitazioni, è necessario adottare un valore della domanda che escluda i consumi non residenziali.
Si assume perciò che la dotazione degli abitanti di Torino sia simile a quella degli abitanti dei piccoli centri della stessa zona geografica, con una popolazione massima di 3-4 migliaia di abitanti, per i quali si assume che l'influenza dei consumi non residenziali sia bassa; di conseguenza la domanda totale pro capite che si può calcolare in base ai dati ISTAT per i piccoli

centri dell'area torinese si può associare anche agli abitanti di Torino. Il valore di domanda giornaliera su base annua che viene assunto alla fine di questa ricerca è di 150 litri/giorno/abitante, uguale peraltro al valore minimo da garantire per legge (DPCM 4/3/1996).
A questo punto, approssimando il rapporto tra domanda non potabile e domanda totale proposto nell'articolo scientifico [5] a 1/3, la domanda non potabile pro capite diventa pari a d=50 litri/giorno/abitante, uguale per definizione per tutti i giorni dell'anno.
La simulazione del funzionamento del serbatoio con questo valore di domanda costante verrà svolta nel capitolo 4. Come detto nel paragrafo 1.1 la domanda varia nel tempo con periodicità a piccola scala e a grande scala, quindi nel capitolo 5 si affronterà il caso in cui la domanda non sia costante, in particolare quando non lo è tra i diversi giorni della settimana.

3.3 Altezza di pioggia

La simulazione del funzionamento del serbatoio necessita di una serie temporale dei valori dell'altezza di pioggia caduta nel bacino dell'edificio in esame. Un modo per ottenere questa serie di dati è quello di utilizzare le registrazioni delle precipitazioni passate, effettuate dalle stazioni pluviometriche e meteorologiche a intervalli di tempo regolari. Queste sono delle misure puntuali, quindi serve un criterio per estendere la loro validità sull'area circostante: nel presente lavoro si è scelto di associare semplicemente ad ogni area sub comunale la stazione meteorologica più vicina al suo baricentro geometrico.
Le stazioni meteorologiche di cui si dispongono i dati sono quelle della rete dell'ARPA Piemonte [13].
All'interno della città di Torino sono attive tre stazioni:

- Reiss Romoli: parte Nord della città, quartiere Borgo Vittoria, misurazioni del periodo 2002-2019
- Consolata: Centro (geografico e storico): via della Consolata, misurazioni del periodo 2004-2019
- Vallere: parte Sud della città, corso Unità d'Italia, misurazioni del periodo 2002-2019

Per ogni stazione vengono fornite le serie annuali dell'altezza di pioggia registrata quotidianamente tra le ore 0 del giorno attuale e le 0 del giorno successivo oppure tra le ore 9 del giorno attuale e le 9 del giorno successivo: in questo lavoro si è scelta la prima opzione.
Per quanto riguarda la stazione Reiss Romoli, si è notato che erano presenti molte lacune nelle misurazioni, pertanto si è deciso di non considerarla. Nella carta di Torino di fig. 23 sono state indicate in arancione e in verde l'ubicazione delle stazioni pluviometrica e si è indicata, con gli stessi colori, l'associazione tra la generica area sub comunale e la stazione pluviometrica ad essa più vicina.
Il grafico di fig. 22 mostra l'andamento temporale dei totali annui di pioggia delle stazioni Vallere e Consolata, calcolati come somma dei dati giornalieri dell'altezza di pioggia forniti da Arpa Piemonte.

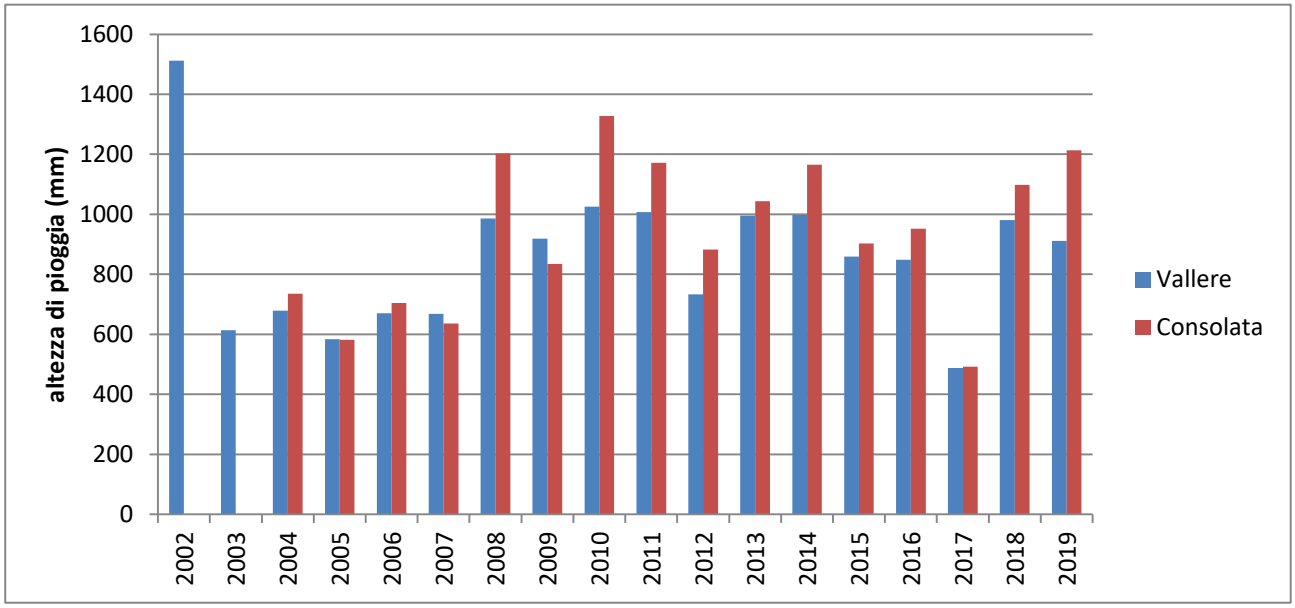


Fig. 22: *totale annuo dell'altezza di pioggia delle stazioni pluviometriche Vallere e Consolata di Torino*

Per conoscere meglio le condizioni pluviometriche di Torino è conveniente calcolare la media e lo scarto quadratico medio dei totali annui di pioggia. Nella tab. 20 sono contenuti questi numeri per le due stazioni.

Stazione	Media (mm)	SQM (mm)
Consolata	933,9	221,9
Vallere	859,9	253,8

Tab. 20: *media e scarto quadratico medio dei totali annui di precipitazione*

La precipitazione totale annua all'interno della città ammonta dunque, in media, a circa 850-950 mm.

3.4 Parametri ϕ, ff ed a

Nel paragrafo 1.2 è stata spiegata l'influenza del bacino sulla reale quantità di acqua piovana utilizzabile: le perdite, rispetto all'offerta lorda, vengono quantificate introducendo il coefficiente di deflusso e l'altezza di acqua di prima pioggia.
Il tipo di tetto più diffuso nella città di Torino è quello tipico dell'Italia centro-settentrionale, a falde inclinate costituite da tegole prevalentemente di terracotta; questo tipo è molto diffuso nell'Europa meridionale e centrale. Si decide di adottare come coefficiente di deflusso un valore costante nel tempo e pari a 0,8, lo stesso che è stato utilizzato dagli autori dell'articolo scientifico di riferimento [5], che hanno studiato la città di Lisbona, caratterizzata anch'essa da tetti di tegole a falde inclinate. Considerare il coefficiente di deflusso costante durante l'evento piovoso è comunque un'approssimazione della realtà.
Riguardo l'altezza d'acqua di prima pioggia, non è stata ricercata la possibile esistenza di prove di qualità svolte sull'acqua piovana raccolta dai tetti della città di Torino, quindi si è adottato il valore usato nello studio di riferimento, pari a 1 millimetro. Come si è detto nel capitolo 2, si è adottata la semplificazione cautelativa che prevede di scartare ogni giorno il

volume di prima pioggia (ovviamente, qualora esso sia inferiore al volume d'acqua intercettato dal tetto).
L'ultimo parametro che deve essere scelto per poter procedere con la simulazione è a, definito nel capitolo 2: esso viene considerato pari a 0.5, ossia solo metà del volume di acqua piovana giornaliera è stato raccolto prima del prelievo. Nel paragrafo 5.3 verrà modificata quest'assunzione e quindi verrà analizzata l'influenza del parametro a sui risultati.

4 Simulazione pluriennale principale

Una volta noti tutti i dati necessari relativi alla città di Torino, è possibile mettere in atto il ciclo di operazioni illustrato nel capitolo 2. Nel presente capitolo vengono presentati i risultati della simulazione del funzionamento del serbatoio che considera un *periodo di riferimento* pluriennale e una domanda giornaliera non potabile pro capite costante e pari a 50 litri.
Il periodo di riferimento è lungo 18 anni per le aree sub comunali afferenti alla stazione meteorologica Vallere (2002-2019) e 16 anni per quelle afferenti alla stazione Consolata (2004-2019); la fig. 23 ricorda la suddivisione delle ASC tra le due stazioni.
È stata scelta come condizione iniziale del serbatoio quella di essere vuoto, poiché esso comincia a riempirsi dopo essere stato installato, tradotto in simboli $V_i(1) = 0$; ciò significa che, per le ASC dipendenti dalla stazione Vallere, $V_i(1/1/2002) = 0$; per quelle invece dipendenti dalla stazione Consolata: $V_i(1/1/2004) = 0$.
A seguito di questa simulazione, che diventerà un riferimento per i capitoli successivi, verranno svolte altre simulazioni, volte a comprendere quale sia l'influenza della scelta dei parametri fatta in questo capitolo sui risultati ottenuti.

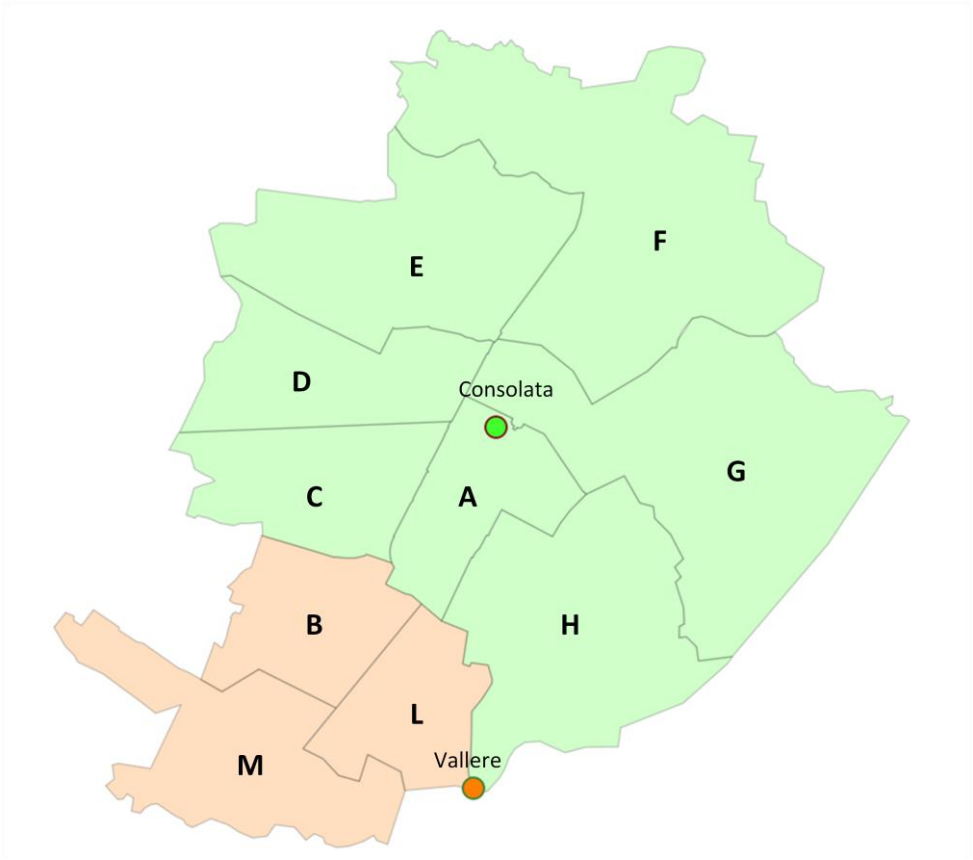


Fig. 23: *mappa di Torino con indicata l'ubicazione delle stazioni meteo e la dipendenza delle ASC dalle due stazioni*

Per quanto riguarda le possibili capacità che può avere il serbatoio, si è deciso di adottare quelle contenute nel vettore seguente (si faccia riferimento alla sintassi di *Matlab*, formula (2.30)):

$$V_s\ (m^3) = [0.1 \quad 0.5 \quad 3 \quad 5 \quad 7.5 \quad 15 \quad 30 \quad 50 \quad 65 \quad 75 \quad 100 \quad 200 \quad 500 \quad 750]$$

Nelle successive tabelle, per ogni edificio rappresentativo, vengono riportati i seguenti risultati:

- NPWS ottimale
- Capacità ottimale del serbatoio
- FURE corrispondente alla capacità ottimale
- risparmio idrico in termini assoluti del singolo edificio, nel periodo di riferimento, formula (2.32)

Per l'intera area sub comunale vengono riportati i seguenti risultati:

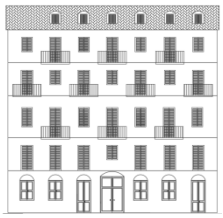
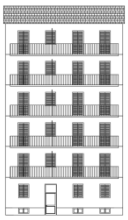
- NPWS di zona
- risparmio idrico in termini assoluti dell'intera area sub comunale, nel periodo di riferimento, formula (2.34).

Si sottolinea il fatto che i risparmi di acqua potabile sono relativi al periodo di riferimento, che non è uguale per tutte le aree sub comunali: per questo motivo non è corretto confrontare i valori del risparmio tra le diverse ASC e tra i differenti edifici. Al fine di confrontare i risparmi idrici, essi verranno successivamente rapportati alla lunghezza del periodo di riferimento, in modo da ottenere un valore medio annuo.

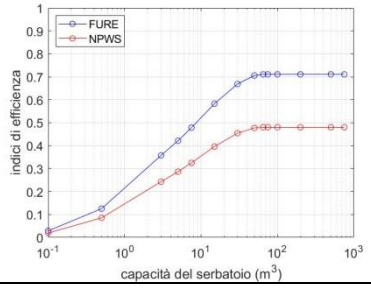
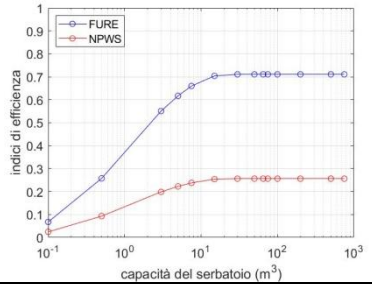
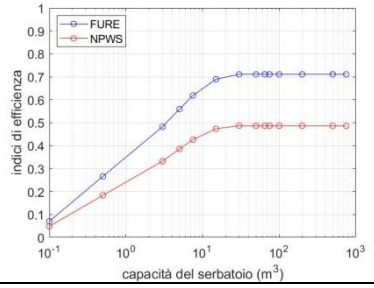
4.1 Risultati per ogni area sub comunale

ASC A: Centro - Crocetta

Dati di pioggia: stazione meteorologica CONSOLATA (periodo di riferimento: 2004-2019)

Tipo di edificio	Tipo 1A	Tipo2	Tipo 3
Frequenza norm. (%)	53,6	33,9	12,6
Area tetto (m²)	385	155	148
Popolazione	33,66 (29)	22,44 (22)	11,22 (11)
			
NPWS ottimale	0.48	0.25	0.47
Volume ottimale (m³)	50	15	15
FURE	0.71	0.70	0.69
Risparmio (m³)	4041	1631	1522
NPWS di zona		0.40	
Risparmio totale (milioni di m³)		9.04	

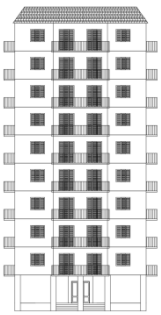
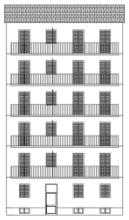
Tab. 21:*risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale A.*

Tipo 1A	Tipo 2	Tipo 3
		

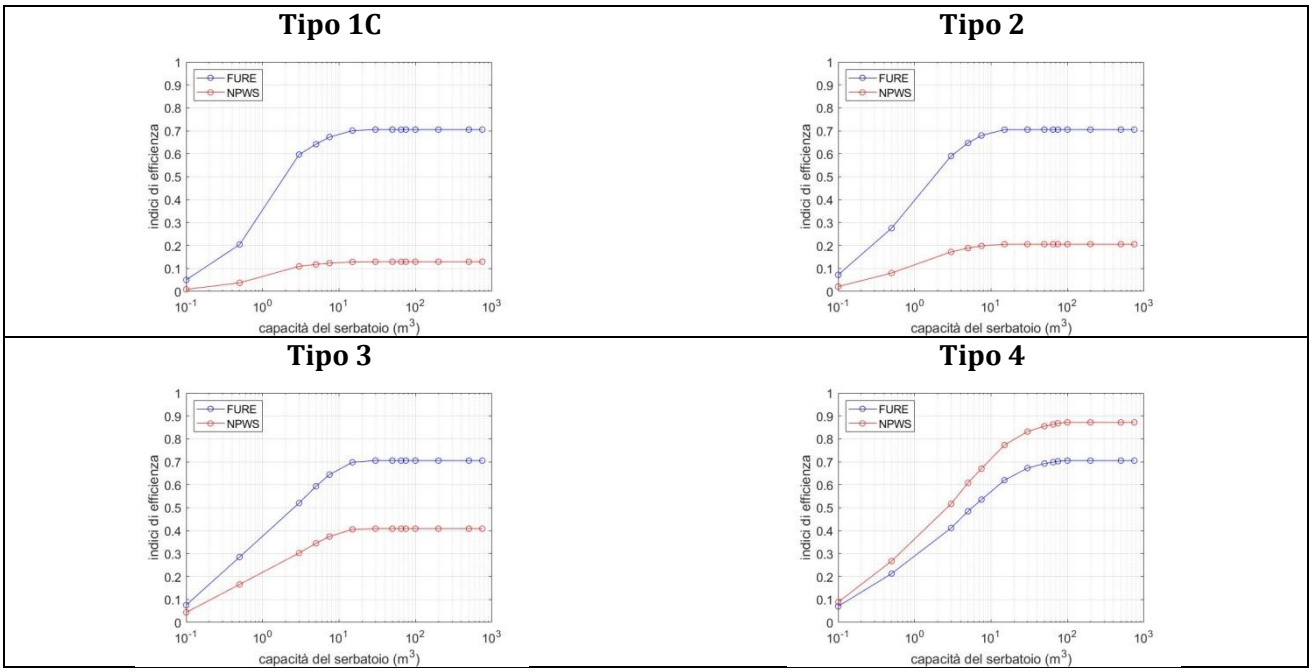
Tab. 22. *Area sub comunale A: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

ASC B: Santa Rita – Mirafiori Nord

Dati di pioggia: stazione meteorologica VALLERE (periodo di riferimento: 2002-2019)

Tipo di edificio	Tipo 1C	Tipo2	Tipo 3	Tipo 4
Frequenza norm. (%)	46,6	22,9	17,9	12,6
Area tetto (m²)	230	155	148	160
Popolazione	55,35 (59)	24,60 (25)	12,30 (12)	6,15 (6)
				
NPWS ottimale	0.12	0.20	0.41	0.83
Volume ottimale (m³)	5	7.5	15	30
FURE	0.64	0.68	0.70	0.67
Risparmio (m³)	2285	1631	1599	1639
NPWS di zona		0.28		
Risparmio totale (milioni di m³)		5.35		

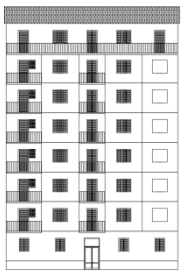
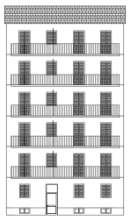
Tab. 23: *risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale B.*



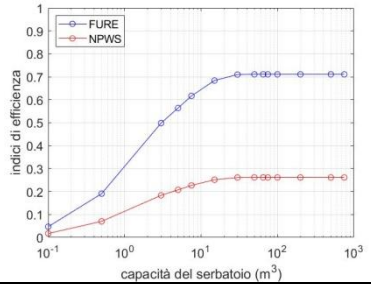
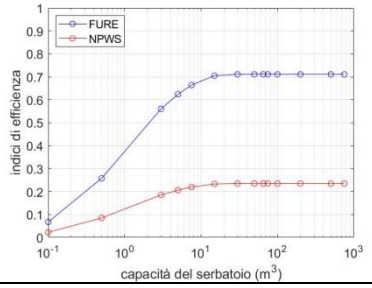
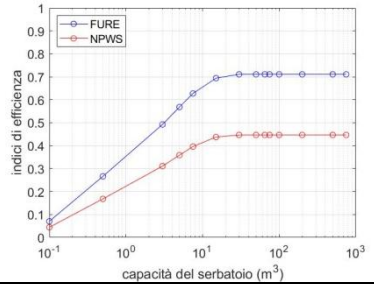
Tab. 24. *Area sub comunale B: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

ASC C: San Paolo – Cenisia – Cit Turin – Pozzo Strada

Dati di pioggia: stazione meteorologica CONSOLATA (periodo di riferimento: 2004-2019)

Tipo di edificio	Tipo 1D	Tipo2	Tipo 3
Frequenza norm. (%)	39,9	38,2	21,9
Area tetto (m²)	230	155	148
Popolazione	32.48 (32)	24.36 (24)	12.18 (12)
			
NPWS ottimale	0.25	0.23	0.44
Volume ottimale (m³)	15	15	15
FURE	0.68	0.71	0.69
Risparmio (m³)	2351	1634	1534
NPWS di zona		0.29	
Risparmio totale (milioni di m³)		9.76	

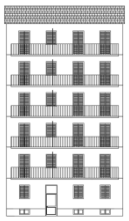
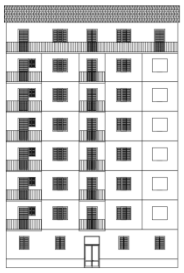
Tab. 25: *risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale C*

Tipo 1D	Tipo 2	Tipo 3
		

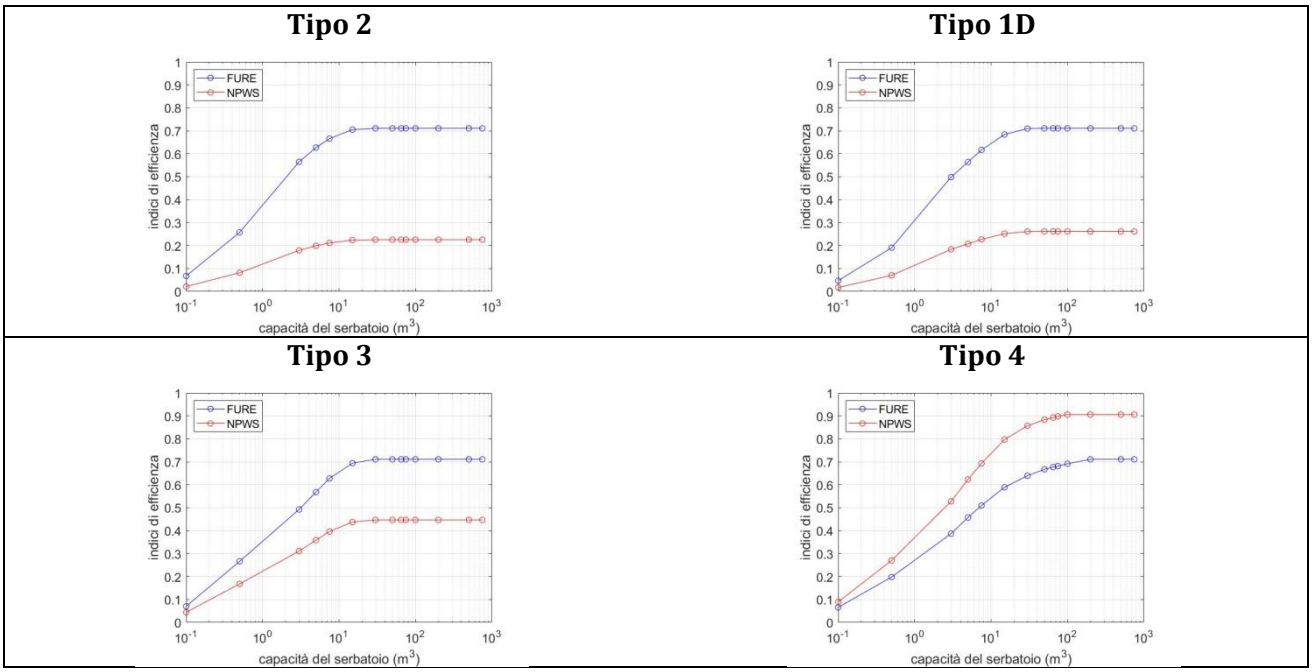
Tab. 26. *Area sub comunale C: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

ASC D: San Donato – Parella - Campidoglio

Dati di pioggia: stazione meteorologica CONSOLATA (periodo di riferimento: 2004-2019)

Tipo di edificio	Tipo2	Tipo 1D	Tipo 3	Tipo 4
Frequenza norm. (%)	35,5	33,6	19,8	11,2
Area tetto (m²)	155	230	148	160
Popolazione	24,60 (25)	32,80 (32)	12,30 (12)	6,15 (6)
				
NPWS ottimale	0.22	0.25	0.44	0.86
Volume ottimale (m³)	15	15	15	30
FURE	0.71	0.68	0.69	0.64
Risparmio (m³)	1635	2351	1534	1502
NPWS di zona	0.35			
Risparmio totale (milioni di m³)	7.73			

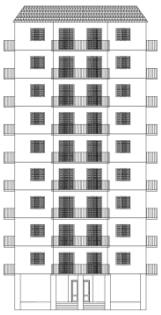
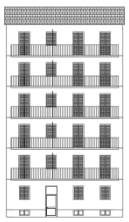
Tab. 27: *risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale D*



Tab. 28. *Area sub comunale D: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

ASC E: Borgo Vittoria - Madonna di Campagna – Lanzo – Lucento - Le Vallette

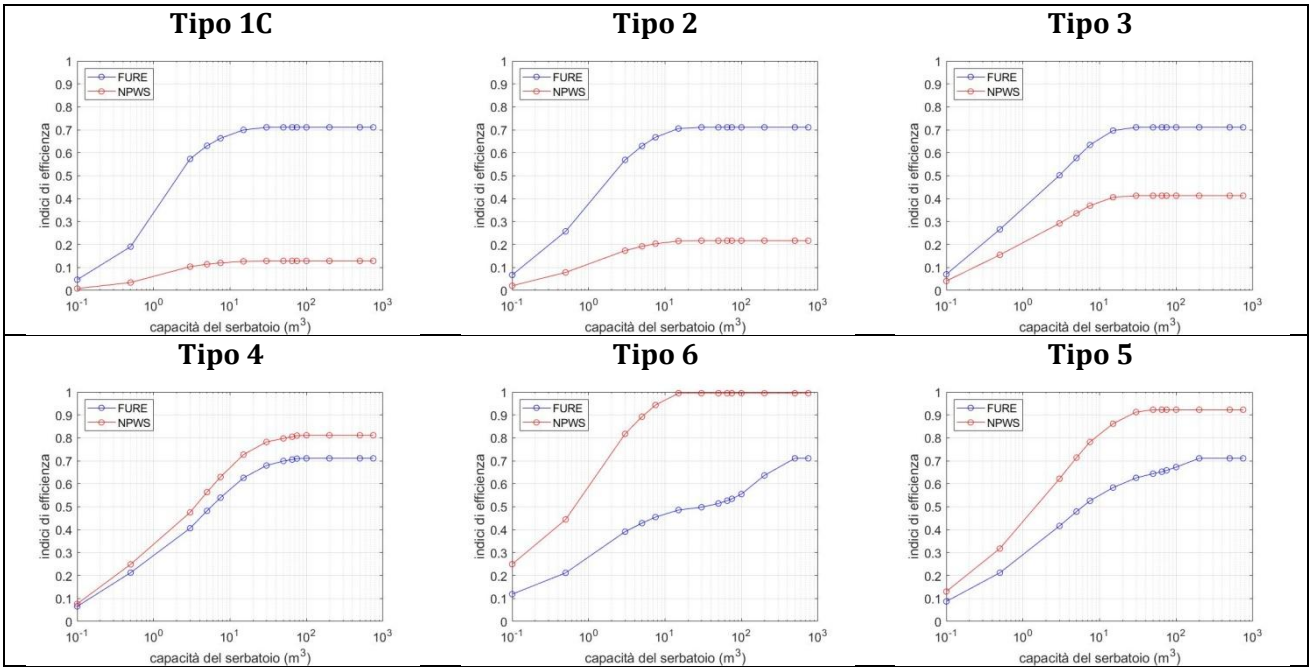
Dati di pioggia: stazione meteorologica CONSOLATA (periodo di riferimento: 2004-2019)

Tipo di edificio	Tipo 1C	Tipo2	Tipo 3	Tipo 4
Frequenza norm. (%)	28,3	18,7	18,3	12,3
Area tetto (m²)	230	155	148	160
Popolazione	59,40 (65)	26,40 (26)	13,20 (13)	6,60 (7)
				
NPWS ottimale	0.13	0.22	0.41	0.78
Volume ottimale (m³)	15	15	15	30
FURE	0.70	0.71	0.70	0.68
Risparmio (m³)	2405	1635	1541	1599

Tipo di edificio	Tipo 6	Tipo 5
Frequenza norm. (%)	11,9	10,5
Area tetto (m²)	82	117
Popolazione	2,20 (2)	4,40 (4)
NPWS ottimale	0.99	0.91
Volume ottimale (m³)	15	30
FURE	0.49	0.63
Risparmio (m³)	581	1066

NPWS di zona	0.46
Risparmio totale (milioni di m³)	7.33

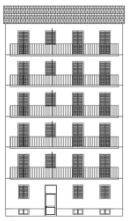
Tab. 29: *risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale E*



Tab. 30. *Area sub comunale E: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

ASC F: Regio Parco – Barca - Bertolla - Barriera di Milano – Rebaudengo – Falchera - Villaretto

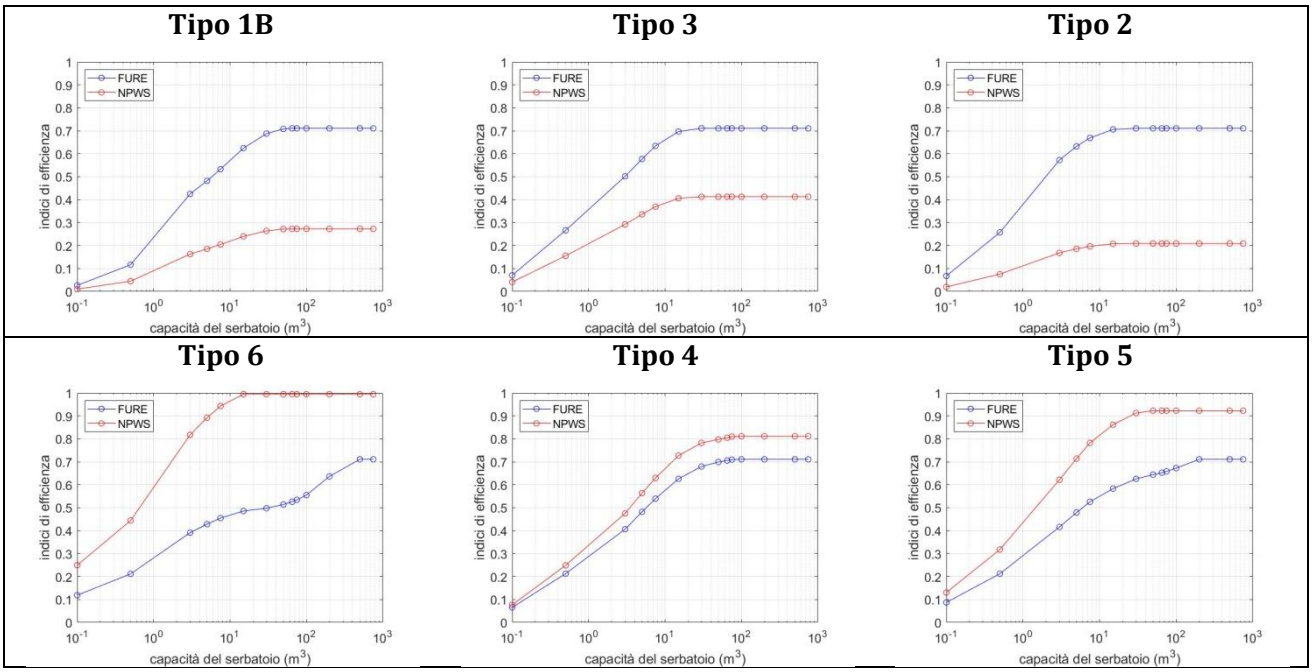
Dati di pioggia: stazione meteorologica CONSOLATA (periodo di riferimento: 2004-2019)

Tipo di edificio	Tipo 1B	Tipo 3	Tipo2	Tipo 6
Frequenza norm. (%)	24,4	17,6	16,0	15,3
Area tetto (m²)	420	148	155	82
Popolazione	60,21 (56)	13,38 (13)	26,76 (27)	2,23 (2)
				
NPWS ottimale	0.26	0.41	0.21	0.99
Volume ottimale (m³)	30	15	15	15
FURE	0.69	0.70	0.71	0.49
Risparmio (m³)	4318	1541	1636	581

Tipo di edificio	Tipo 4	Tipo 5
Frequenza norm. (%)	14,4	12,4
Area tetto (m²)	160	117
Popolazione	6,69 (7)	4,46 (4)
NPWS ottimale	0.78	0.91
Volume ottimale (m³)	30	30
FURE	0.68	0.63
Risparmio (m³)	1599	1066

NPWS di zona	0.55
Risparmio totale (milioni di m³)	9.50

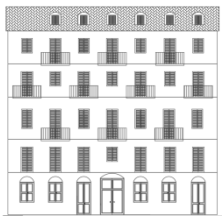
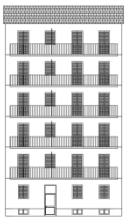
Tab. 31: *risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale F*



Tab. 32. *Area sub comunale F: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

ASC G: Aurora – Vanchiglia – Sassi – Madonna del Pilone

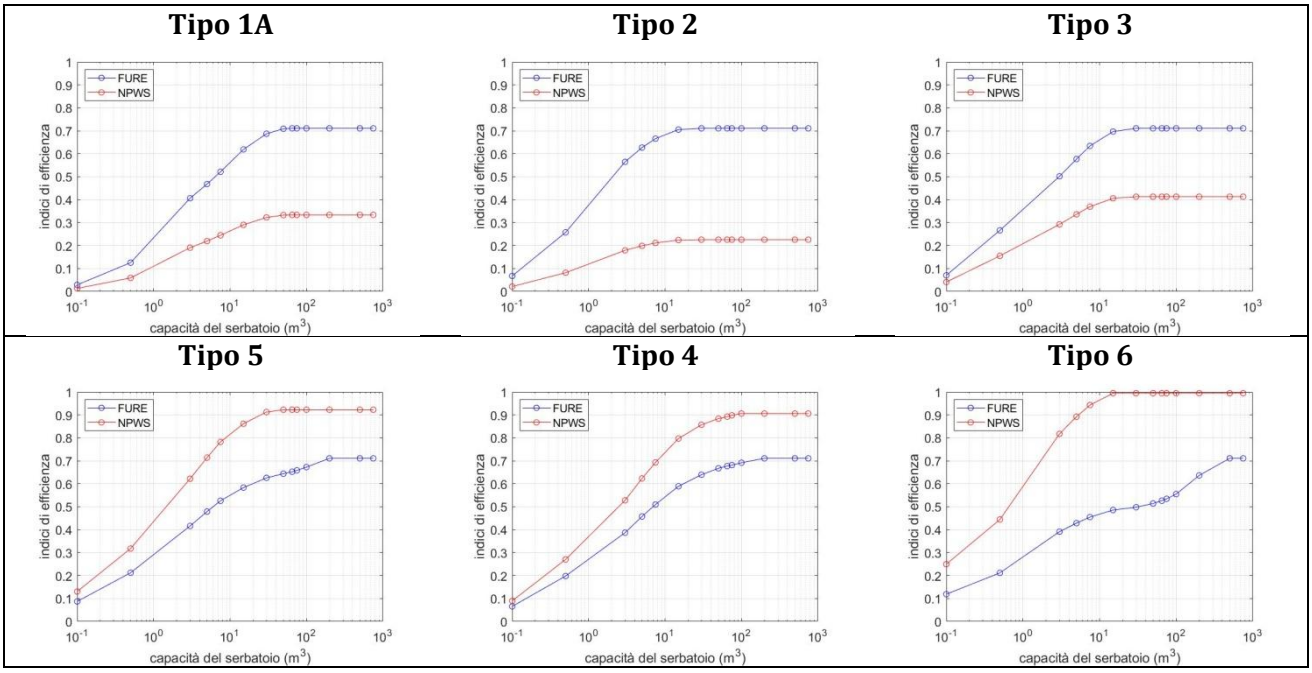
Dati di pioggia: stazione meteorologica CONSOLATA (periodo di riferimento: 2004-2019)

Tipo di edificio	Tipo 1A	Tipo2	Tipo 3	Tipo 5
Frequenza norm. (%)	26,2	17,5	14,7	14,5
Area tetto (m²)	385	155	148	117
Popolazione	37,62 (42)	25,08 (25)	12,54 (13)	4,18 (4)
				
NPWS ottimale	0.32	0.22	0.41	0.91
Volume ottimale (m³)	30	15	15	30
FURE	0.69	0.71	0.70	0.63
Risparmio (m³)	3954	1635	1541	1066

Tipo di edificio	Tipo 4	Tipo 6
Frequenza norm. (%)	14,5	12,7
Area tetto (m²)	160	82
Popolazione	6,27 (6)	2,09 (2)
NPWS ottimale	0.86	0.99
Volume ottimale (m³)	30	15
FURE	0.64	0.49
Risparmio (m³)	1502	581

NPWS di zona	0.57
Risparmio totale (milioni di m³)	8.80

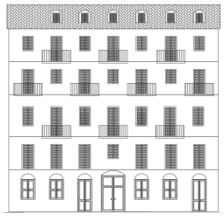
Tab. 33: *risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale G*

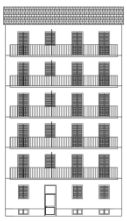


Tab. 34. *Area sub comunale G: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

ASC H: Borgo Po – San Salvario – Cavoretto

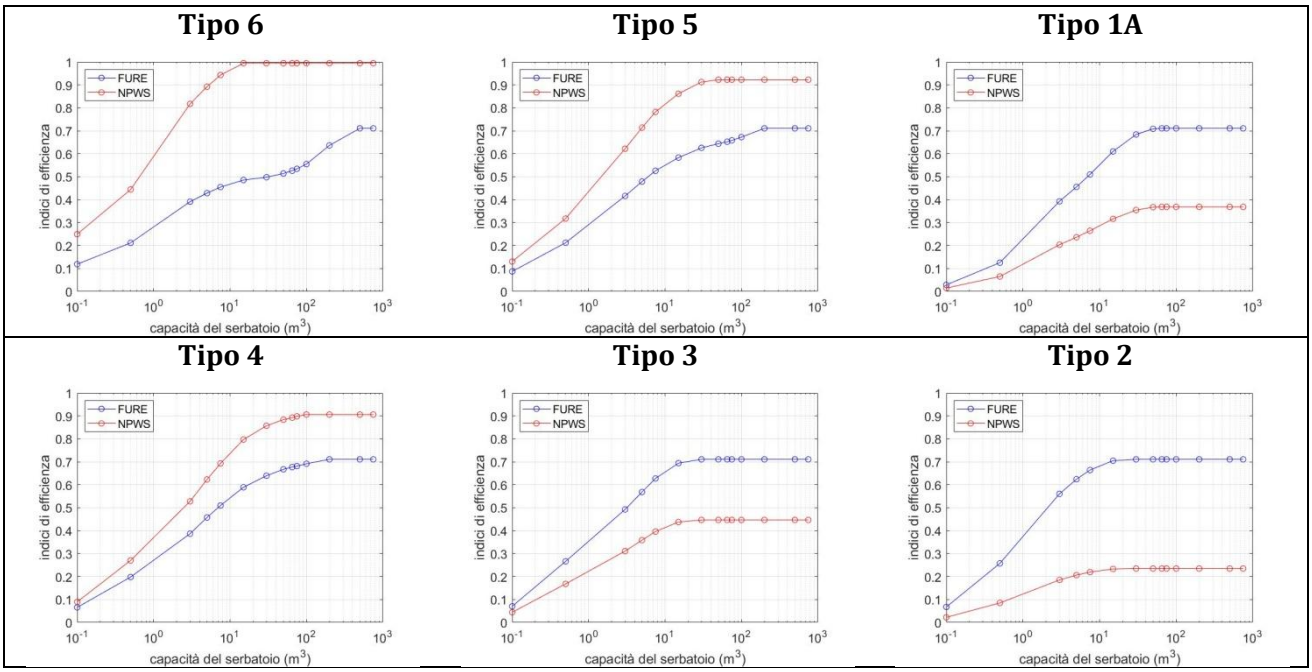
Dati di pioggia: stazione meteorologica CONSOLATA (periodo di riferimento: 2004-2019)

Tipo di edificio	Tipo 6	Tipo 5	Tipo 1A	Tipo 4
Frequenza norm. (%)	25,0	18,4	17,0	15,8
Area tetto (m^2)	82	117	385	160
Popolazione	2,01 (2)	4,02 (4)	36,18 (38)	6,0 (6)
				
NPWS ottimale	0.99	0.91	0.35	0.86
Volume ottimale (m^3)	15	30	30	30
FURE	0.49	0.63	0.68	0.64
Risparmio (m^3)	581	1066	3937	1502

Tipo di edificio	Tipo 3	Tipo2
Frequenza norm. (%)	12,4	11,4
Area tetto (m^2)	148	155
Popolazione	12,06 (12)	24,12 (24)
		
NPWS ottimale	0.44	0.23
Volume ottimale (m^3)	15	15
FURE	0.69	0.71
Risparmio (m^3)	1534	1634

NPWS di zona	0.69
Risparmio totale (milioni di m^3)	7.00

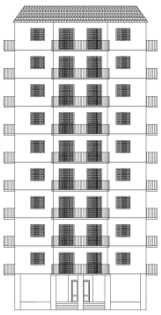
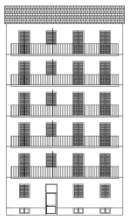
Tab. 35: *risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale H*



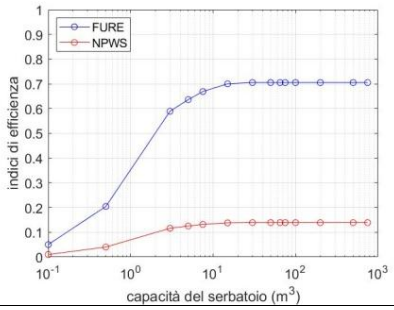
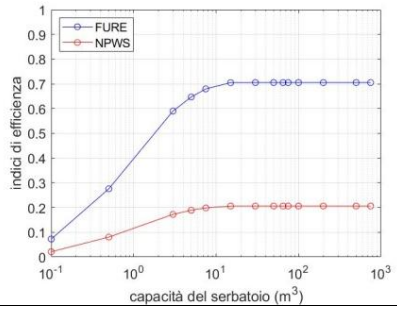
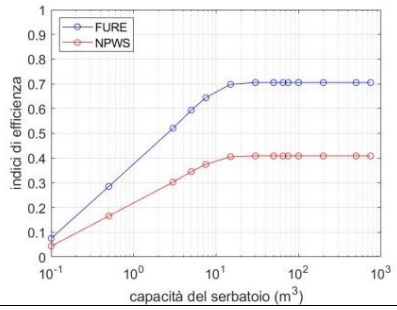
Tab. 36. *Area sub comunale H: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

ASC L: Nizza Millefonti – Lingotto - Filadelfia

Dati di pioggia: stazione meteorologica VALLERE (periodo di riferimento: 2002-2019)

Tipo di edificio	Tipo 1C	Tipo2	Tipo 3
Frequenza norm. (%)	62,3	25,3	12,4
Area tetto (m²)	230	155	148
Popolazione	55,89 (55)	24,84 (25)	12,42 (12)
			
NPWS ottimale	0.13	0.20	0.41
Volume ottimale (m³)	7.5	7.5	15
FURE	0.67	0.68	0.70
Risparmio (m³)	2382	1631	1599
NPWS di zona		0.18	
Risparmio totale (milioni di m³)		3.66	

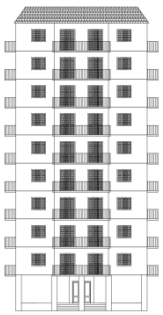
Tab. 37: *risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale L*

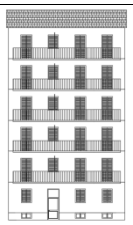
Tipo 1C	Tipo 2	Tipo 3
		

Tab. 38. *Area sub comunale L: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

ASC M: Mirafiori Sud

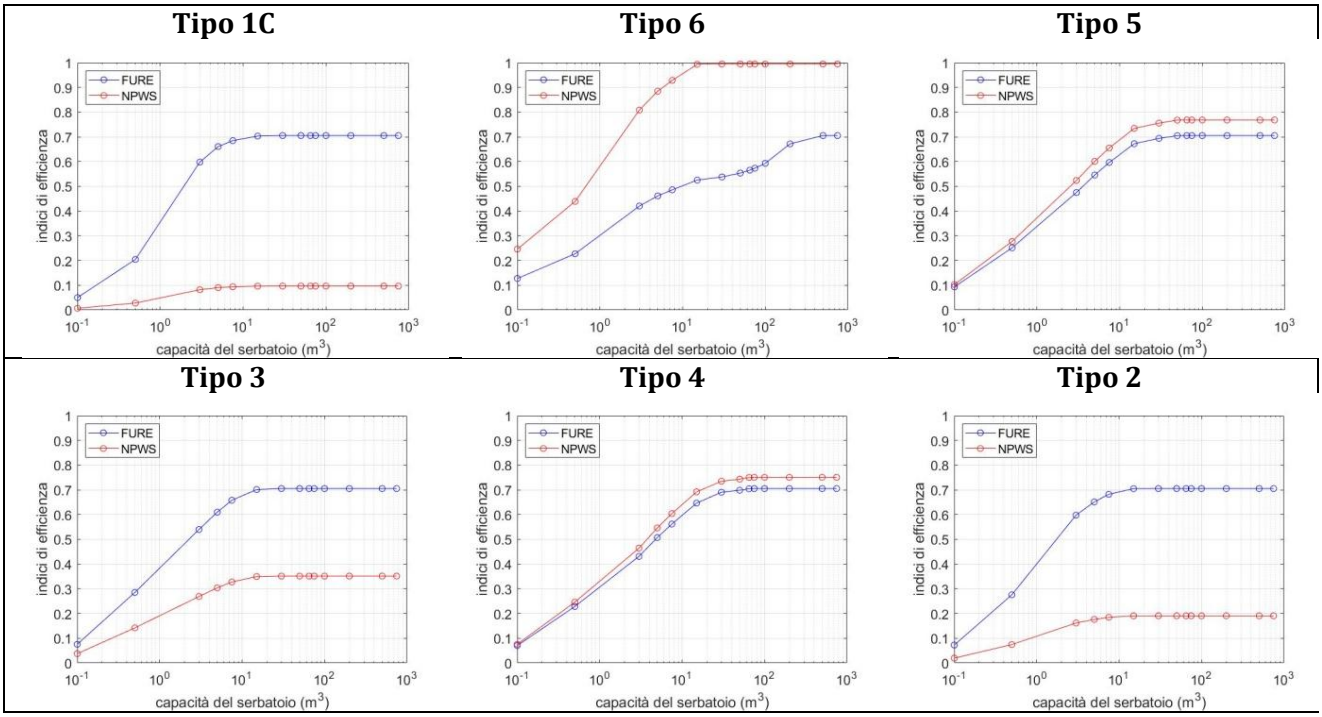
Dati di pioggia: stazione meteorologica VALLERE (periodo di riferimento: 2002-2019)

Tipo di edificio	Tipo 1C	Tipo 6	Tipo 5	Tipo 3
Frequenza norm. (%)	26,4	19,0	14,6	13,9
Area tetto (m²)	230	82	117	148
Popolazione	60,75 (79)	2,25 (2)	4,50 (5)	13,50 (14)
				
NPWS ottimale	0.09	0.99	0.73	0.35
Volume ottimale (m³)	5	15	15	15
FURE	0.66	0.53	0.67	0.70
Risparmio (m³)	2353	653	1206	1606

Tipo di edificio	Tipo 4	Tipo2
Frequenza relativa (%)	13,3	12,8
Area tetto (m²)	160	155
Popolazione	6,75 (7)	27,00 (27)
		
NPWS ottimale	0.73	0.18
Volume ottimale (m³)	30	5
FURE	0.69	0.65
Risparmio (m³)	1690	1563

NPWS di zona	0.49
Risparmio totale (milioni di m³)	2.1

Tab. 39: *risultati della simulazione su base pluriennale del funzionamento del serbatoio posto a servizio del sistema di raccolta dell'acqua piovana installato negli edifici rappresentativi dell'area sub comunale M*



Tab. 40. *Area sub comunale M: andamento degli indici NPWS e FURE in funzione della capacità del serbatoio V_s, per i tipi di edificio presenti nell'ASC*

4.2 Andamento di NPWS e FURE per i diversi edifici

Al fine di dedurre le principali differenze di comportamento tra gli edifici considerati nella simulazione, viene estratto dall'insieme dei risultati, il risultato di un edificio-individuo per ognuno dei nove tipi, prestando attenzione affinché siano tutti afferenti alla stessa stazione

pluviometrica, in particolare tutti appartenenti alla parte di città i cui dati di pioggia provengono dalla stazione Consolata, in modo che la variabilità spaziale dei dati di pioggia non debba essere presa in considerazione; si ricorda invece che la variabilità di popolazione continua a sussistere, poiché la popolazione interna ad uno stesso edificio è diversa, in generale, tra aree sub comunali differenti. Si rammenta inoltre che uno dei parametri fondamentali che caratterizzano gli edifici è il rapporto tra l'area del tetto e il numero di abitanti, ossia l'area pro capite. In tab. 41 sono contenuti gli edifici campionati e la loro area pro capite.

Tipo di edificio	ASC di appartenenza	Area del tetto (m^2)	abitanti	Area pro capite (apc) (m^2/abitante)
1A	A	385	29	13,3
1B	F	420	56	7,5
1C	E	230	65	3,5
1D	C	230	32	7,2
2	A	155	22	7,1
3	A	148	11	13,5
4	E	160	7	22,9
5	E	117	4	29,3
6	E	82	2	41,0

Tab. 41: *edifici campionati e loro area del tetto pro capite*

Di seguito sono rappresentati gli andamenti dell'indice FURE: per evitare un'eccessiva sovrapposizione di linee, in fig. 24 vengono riportati gli andamenti degli edifici di tipo 1C, 2, 3, 4, 5, 6 mentre in fig. 25 sono rappresentati gli andamenti degli edifici di classe 1.

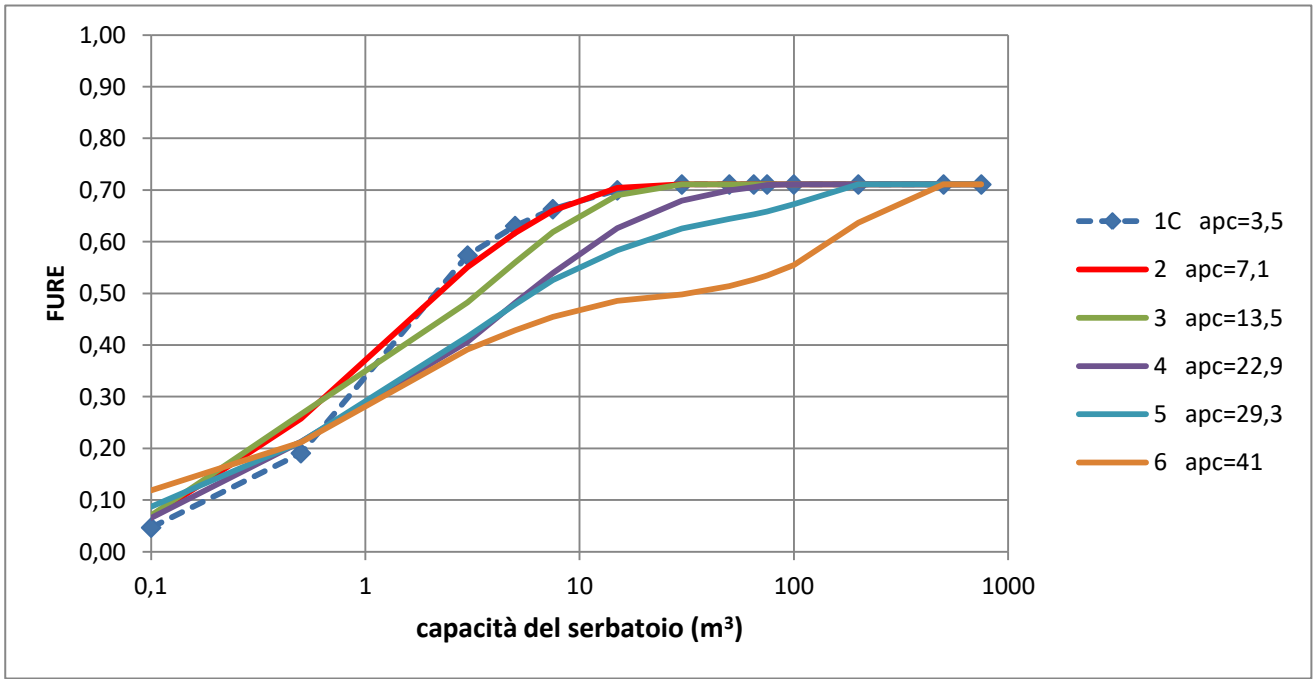


Fig. 24: *andamento di FURE per i diversi tipi di edificio, caratterizzati dal proprio valore di area pro capite (apc)*

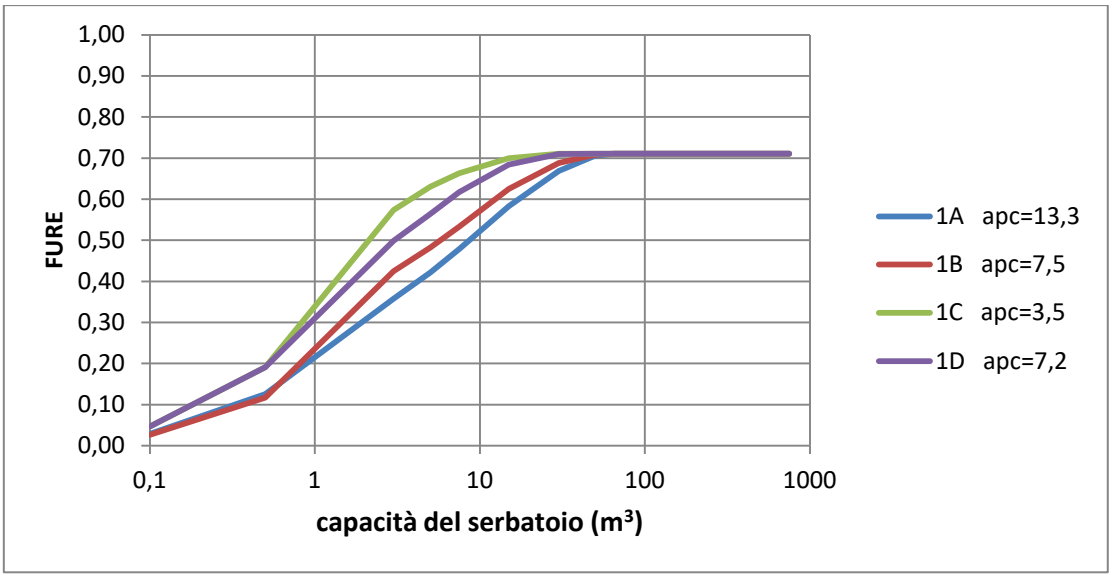


Fig. 25: *andamento di FURE per i diversi tipi di edificio, caratterizzati dal valore di area pro capite (apc)*

Le due figure precedenti mostrano chiaramente che il massimo FURE raggiungibile da qualsiasi edificio è indipendente dalla sua area del tetto, ma, come dimostrato nel paragrafo 1.4.1 esso dipende soltanto dall'altezza di pioggia, dal coefficiente di deflusso e dall'altezza di first flush: con i dati che sono stati scelti, il valore limite di FURE è pari a circa 0,71.

Il valore di capacità col quale ogni edificio raggiunge il $FURE_{limite}$ dipende sia dall'offerta che dalla domanda: infatti solo se l'area del tetto fosse uguale per tutti gli edifici si potrebbe affermare che tale capacità cresce con il diminuire della popolazione, ossia con l'aumentare dell'area pro capite. Comunque, anche se l'area del tetto è variabile, si vede che gli edifici con grande area pro capite raggiungono il limite di FURE con valori di capacità più alti rispetto agli altri.

Di seguito sono rappresentati gli andamenti dell'indice NPWS, suddivisi come fatto in precedenza tra la fig. 26 e la fig. 27.

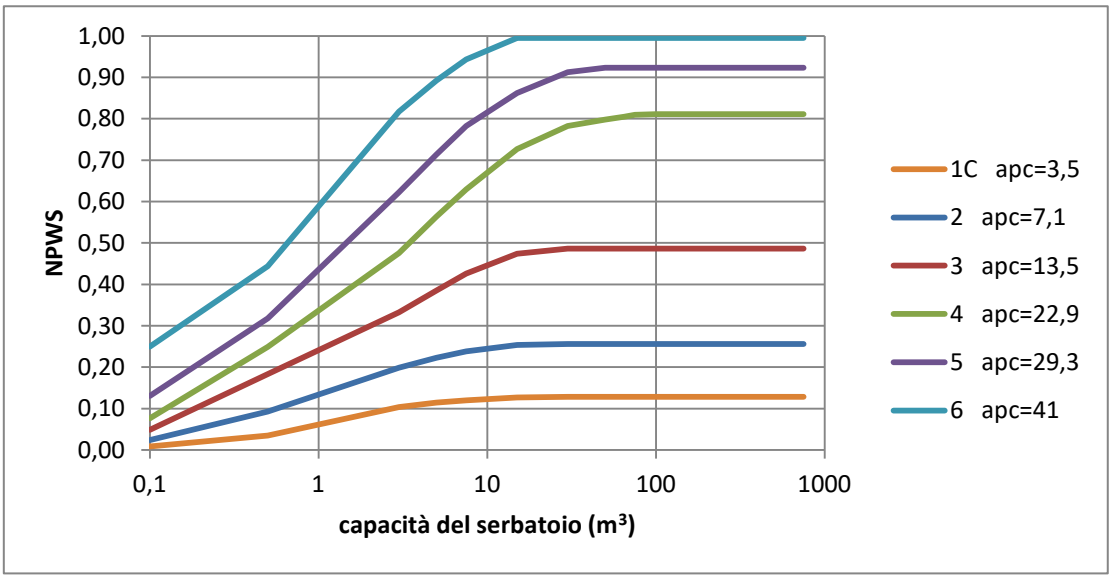


Fig. 26: *andamento di NPWS per i diversi tipi di edificio, caratterizzati dal valore di area pro capite (apc)*

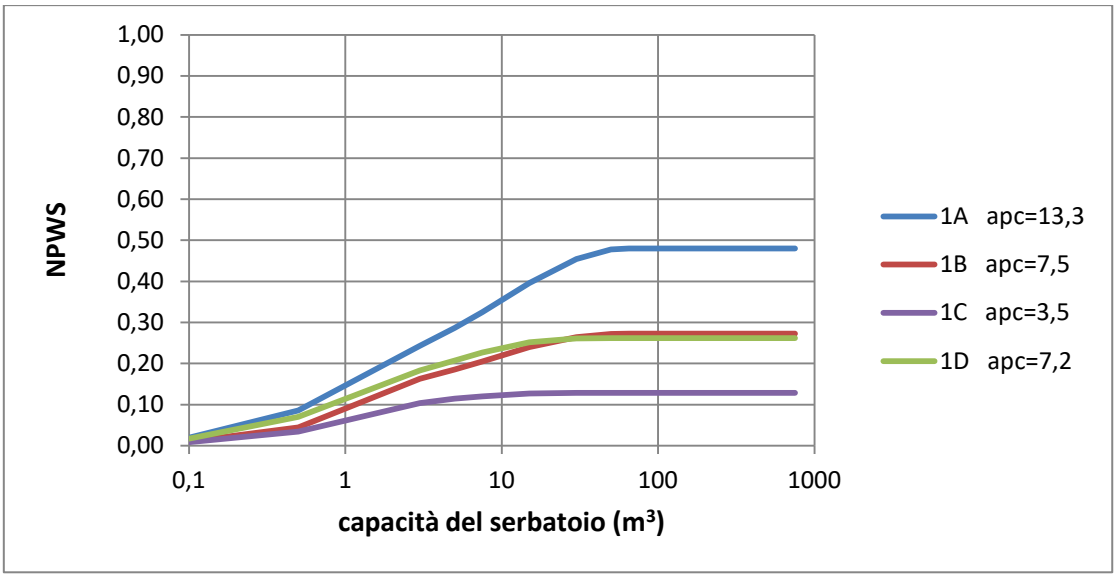


Fig. 27: *andamento di NPWS per i diversi tipi di edificio, caratterizzati dal valore di area pro capite (apc)*

Un risultato già ampiamente discusso fin dal capitolo 1 è che il massimo NPWS raggiungibile da ogni edificio aumenta proporzionalmente all'area pro capite: quindi la frazione di domanda non potabile sostituibile con acqua piovana cresce dall'edificio di tipo 1C all'edificio di tipo 6 (fig. 26), mentre all'interno della classe 1 sono presenti edifici con area pro capite anche molto diverse tra loro e in certi casi simili a quelle di edifici di altre classi.
Riguardo la capacità ottimale di ogni edificio, si ricorda che essa viene stabilita in modo numerico calcolando l'incremento di NPWS rispetto al valore precedente e confrontandolo col valore 5%: da ciò deriva che la capacità ottimale ottenuta non è esattamente l'ascissa del punto in cui la curva si stabilizza sul valore massimo, ma può esserne inferiore: in particolare, l'incremento calcolato è direttamente proporzionale al valore stesso di NPWS e quindi lo scostamento tra la capacità ottimale calcolata e l'ascissa del punto in cui la curva si stabilizza sul massimo (definibile *capacità ottimale teorica*) è tanto maggiore quanto più grande è $NPWS_{ott}$. Nelle considerazioni seguenti si farà riferimento alla capacità ottimale teorica. Entrando nel merito delle considerazioni, bisogna notare che il confronto tra le capacità ottimali teoriche dei vari edifici non è immediato, a causa delle differenti aree dei tetti. Si ricorda infatti che è solo nel caso in cui l'area del tetto fosse uguale per un insieme di edifici con diversa domanda d'acqua, che si avrebbe il comportamento descritto alla fine del paragrafo 1.4.1 e cioè che la capacità ottimale crescerebbe assieme alla domanda fintanto che tale domanda fosse inferiore all'offerta netta ($NPWS_{ott} = 1$) e invece decrescerebbe assieme alla domanda se tale domanda superasse l'offerta netta ($NPWS_{ott} < 1$).
I tipi di edificio dall'1 al 5 sono caratterizzati da una domanda superiore all'offerta netta. Si osservino i tipi 2, 3, 4, caratterizzati da un'area del tetto simile: come ci si aspetterebbe, la capacità che porta al massimo di NPWS cresce poiché la domanda diminuisce. Riguardo il tipo 5, la popolazione è inferiore a quella del tipo 4, quindi, a parità di area del tetto la capacità ottimale sarebbe maggiore, ma siccome anche l'area del tetto è inferiore questo non accade, ma anzi la capacità ottimale è leggermente minore.
L'unico tipo di edificio per cui l'offerta netta è sufficiente soddisfare la domanda è il tipo 6: la capienza ottimale è inferiore a quella del tipo 5. Sebbene un confronto diretto non sia immediato, perché l'area del tetto dei due edifici è diversa, la diminuzione della capacità ottimale non stupisce, perché come si è ricordato pocanzi, quando si opera nel campo in cui l'offerta è superiore alla domanda, la capacità del serbatoio occorrente a soddisfarla scala con la domanda stessa e quindi, nel caso del tipo 6, la capacità ottimale diminuisce.

Tra gli edifici di tipo 1C e 1D il confronto è immediato, poiché possiedono la stessa area del tetto: dato che la popolazione diminuisce, nel secondo, $NPWS_{ott}$ è maggiore, come è maggiore la capacità ottimale, poiché diminuisce la domanda.
Tra gli edifici di tipo 1B e 1A l'area del tetto varia, quindi il confronto non è immediato, tuttavia, osservando che la popolazione diminuisce, si giustifica il fatto che la capacità ottimale è leggermente superiore; si deve però mettere in conto che la diminuzione dell'offerta netta tende a compensare la diminuzione della domanda, quindi se l'offerta netta fosse uguale per i due edifici, l'aumento di capacità ottimale sarebbe maggiore di quello che si è osservato.
L'analisi dei diversi comportamenti degli edifici svolta in questo paragrafo ha messo in luce come il solo parametro dell'area pro capite sia insufficiente a spiegare i diversi valori di capacità ottimale ottenuti dalla simulazione: nel paragrafo 4.5 si ritornerà su questi risultati con l'obiettivo di ottenere una spiegazione più esaustiva.

4.3 Mappa del risparmio idrico: NPWS di zona

La carta seguente mostra il valore dell'indice NPWS di zona nelle diverse aree sub comunali di Torino; è possibile confrontare le ASC anche sulla base dell'intensità del colore. Si ricorda che NPWS di zona è una media pesata degli indici NPWS ottimali degli edifici presenti in tale zona, valore che è diverso dalla frazione di domanda non potabile dell'intera zona che può venire sostituita dall'acqua piovana.

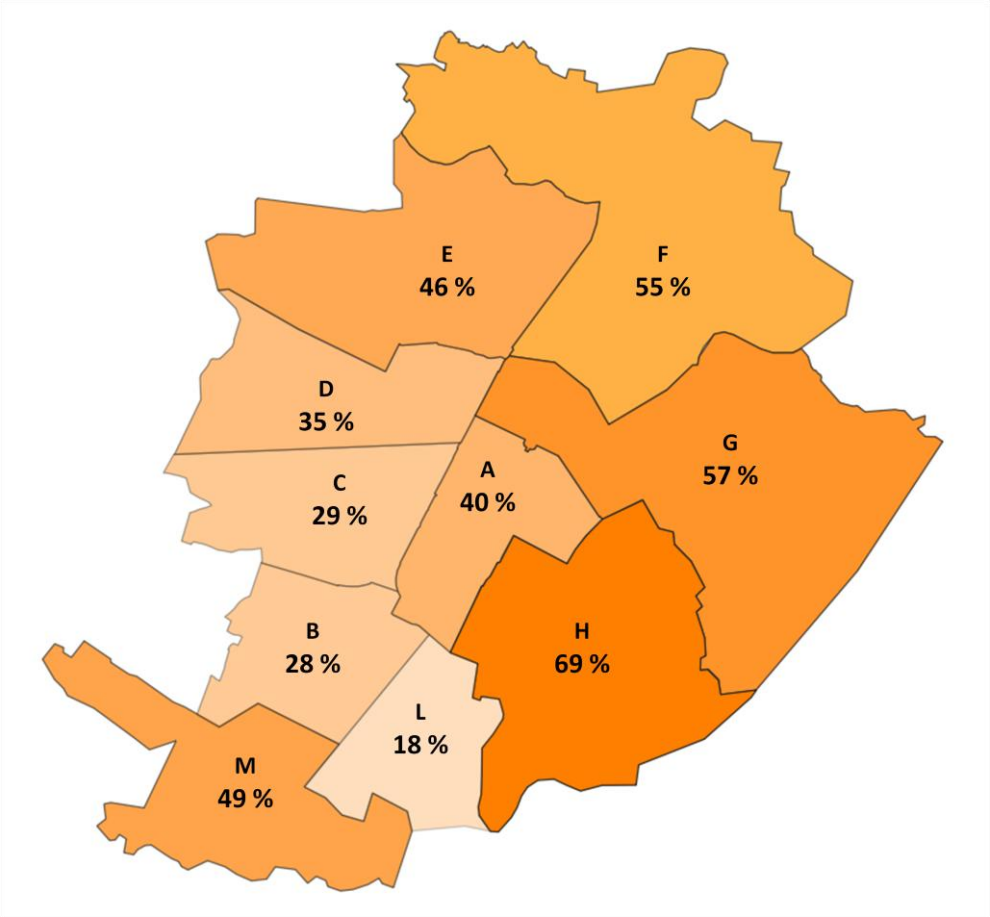


Fig. 28: *mappa dell'indice NPWS di zona (in percentuale)*

L'indice NPWS di zona varia, come si può vedere nella fig. 28, tra 18% (ASC L) e 69% (ASC H). Questa differenza è dovuta in larghissima parte ai diversi tipi di edifici presenti e in minima parte alla differente altezza di pioggia: quest'ultima è leggermente inferiore nella parte meridionale della città (aree B, L, M, misure della stazione Vallere) rispetto al Centro-Nord (misure della stazione Consolata). L'area sub comunale L è infatti ricca di edifici snelli, ossia aventi una piccola area del bacino rapportata al numero di occupanti, mentre l'area H appartiene in larga parte alla zona collinare e quindi la maggioranza degli edifici sono tozzi, ossia hanno un'area del bacino pro capite molto grande. Anche la zona G, in prevalenza collinare, mostra un NPWS elevato.
La parte antica della città, compresa nei confini dell'ASC A, mostra un buon valore dell'indice, in quanto gli edifici sono tozzi. All'opposto, le zone costruite prevalentemente nel Secondo dopoguerra e ricche di edifici molto alti e snelli (aree B, L) mostrano un NPWS basso. Le zone edificate in questo stesso periodo, ma che presentano un valore più alto dell'indice (M, E, F) sono quelle più eterogenee dal punto di vista edilizio, dove sono molto diffusi edifici di piccole dimensioni misti ad edifici alti e snelli.
L'indice NPWS è un valore relativo, indipendente dal numero di abitanti dell'ASC e quindi dalla domanda d'acqua. La mappa della riduzione del volume di acqua potabile prelevato dall'acquedotto è invece dipendente dal numero di abitanti e può per questo motivo essere diversa da quella dell' NPWS di fig. 28.

4.4 Risparmio idrico assoluto

Il volume di acqua piovana utilizzata per fini non potabili è pari al volume di acqua potabile che non viene prelevato dall'acquedotto, definibile sinteticamente *risparmio*. Alla scala dell'edificio, esso viene calcolato con la formula (2.32): la somma dei risparmi di ogni edificio dell'area sub comunale equivale al risparmio dell'intera zona e viene calcolato con la formula (2.34). Bisogna però tenere presente che i periodi di riferimento sono diversi tra le ASC del Sud (18 anni) e quelle del Centro-Nord cittadino (16 anni), quindi, per poter rendere confrontabili i risultati di tutte le zone della città, il risparmio viene diviso per la lunghezza del periodo di riferimento, in modo da ottenere il risparmio annuo medio. La tab. 42 mostra proprio questi valori medi annui, per il singolo tipo di edificio ($V_{risp,\ annuo\ medio,\ k}$) sono espressi in m³, mentre per l'intera area sub comunale ($V_{risp,\ annuo\ medio,\ ASC}$) sono espressi in migliaia di m³.

ASC	Periodo di riferimento (anni)	Tipo di edificio	$V_{risp,\ annuo\ medio,\ k}$ (m³)	$V_{risp,\ annuo\ medio,\ ASC}$ (migliaia di m³)
A	16	1A 2 3	252,6 101,94 95,1	565
B	18	1C 2 3 4	126,9 90,6 88,8 91,1	297
C	16	1D 2 3	146,9 102,1 95,9	610
D	16	1D 2 3 4	146,9 102,2 95,9 93,9	483

ASC	Periodo di riferimento (anni)	Tipo di edificio	$V_{risp,\ annuo\ medio,\ k}$ (m³)	$V_{risp,\ annuo\ medio,\ ASC}$ (migliaia di m³)
E	16	1C 2 3 4 5 6	150,3 102,2 96,3 99,9 66,6 36,3	458
F	16	1B 2 3 4 5 6	269,9 102,3 96,3 99,9 66,6 36,3	594
G	16	1A 2 3 4 5 6	247,1 102,2 96,3 93,9 66,6 36,3	550
H	16	1A 2 3 4 5 6	246,1 102,1 95,9 93,9 66,6 36,3	438
L	18	1C 2 3	132,3 90,6 88,8	203
M	18	1C 2 3 4 5 6	130,7 86,8 89,2 93,9 67,0 36,3	117

Tab. 42:*risparmio medio annuo di acqua potabile per tipo di edificio e per area sub comunale*

Successivamente, dividendo il risparmio medio annuo dell'edificio per il suo numero di abitanti, viene stimato il risparmio pro capite per ogni tipo di edificio. La carta di fig. 29 mostra il risparmio annuo pro capite per ogni tipo di edificio (1A, 1B, 1C, 1D, 2, 3, 4, 5, 6) presente nelle diverse aree sub comunali, espresso in m³. Sotto la lettera che identifica l'ASC è ripetuto il risparmio annuo medio dell'intera zona, già mostrato nella tab. 42.

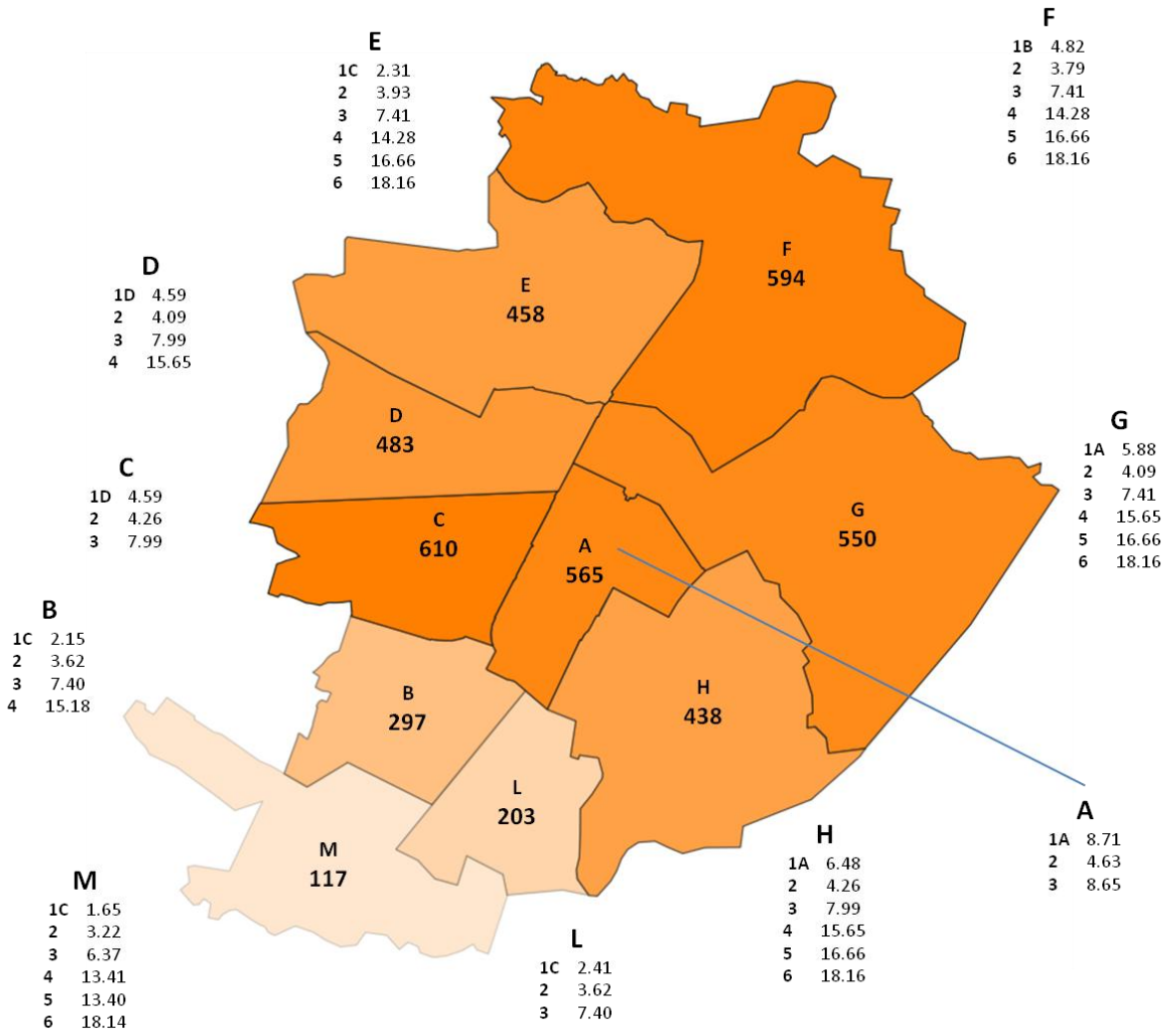


Fig. 29: *all'interno dei confini dell'area sub comunale è indicato il risparmio annuo medio della zona (in migliaia di m³);all'esterno è indicato il risparmio annuo medio pro capite per classe di edifici (m³)*

4.5 Sintesi dei risultati

I risultati ottenuti possono essere utilizzati per ricavare due strumenti predittivi, come proposto nell'articolo scientifico di riferimento [5], che permettano di calcolare agevolmente la capacità ottimale del serbatoio e l'NPWS ottimale di qualsiasi edificio presente nella città, caratterizzato dai consueti parametri fondamentali dell'area del tetto e degli abitanti. La forma di tali leggi predittive è la seguente:

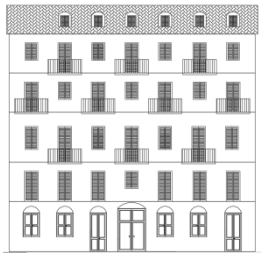
$$V_{ottimale} = f(area\ tetto, occupanti) = a + b \cdot area\ tetto + c \cdot occupanti \tag{4.1}$$

$$NPWS = f\left(\frac{area\ tetto}{occupanti}\right) = d + e \cdot \frac{area\ tetto}{occupanti} \tag{4.2}$$

Queste leggi valgono solamente per la città di Torino, poiché tutti i risultati che sono stati ottenuti dipendono dall'altezza di pioggia ricavata dalle sue stazioni meteorologiche.

4.5.1 Riepilogo dei risultati

Ognuno dei nove tipi di edificio rappresentativo, una volta calati nel contesto della specifica area sub comunale è caratterizzato da una sua popolazione ed un particolare valore dell'altezza di pioggia: per questo motivo la capacità ottimale del serbatoio, così come l'NPWS ottimale e il FURE dello stesso tipo di edificio possono essere in generale diversi da zona a zona. Nelle tabelle seguenti sono riassunti i risultati delle simulazioni per ogni tipo di edificio.

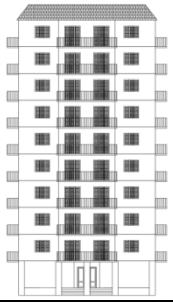


Tipo 1A – A=385 m²

ASC	popolazione	NPWS	V ottimale(m³)	FURE
A	29	0.48	50	0.71
G	42	0.32	30	0.69
H	38	0.35	30	0.68

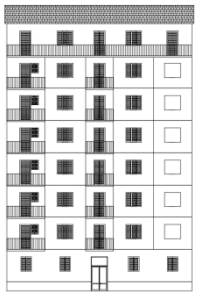
Tipo 1B – A=420 m²

ASC	popolazione	NPWS	V ottimale(m³)	FURE
F	56	0.26	30	0.69



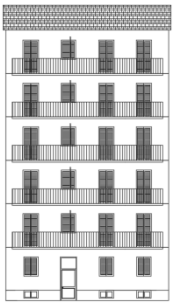
Tipo 1C – A=230 m²

ASC	popolazione	NPWS	V ottimale(m³)	FURE
B	59	0.12	5	0.64
E	65	0.13	15	0.70
L	55	0.13	7.5	0.67
M	79	0.09	5	0.66

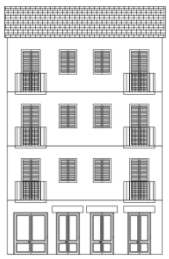


Tipo 1D – A=230 m²

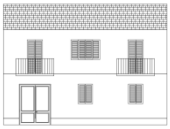
ASC	popolazione	NPWS	V ottimale(m³)	FURE
C	32	0.25	15	0.68
D	32	0.25	15	0.68



Tipo 2 – A=155 m²				
ASC	popolazione	NPWS	V ottimale(m³)	FURE
A	22	0.25	15	0.70
B	25	0.20	7.5	0.68
C	24	0.23	15	0.71
D	25	0.22	15	0.71
E	26	0.22	15	0.71
F	27	0.21	15	0.71
G	25	0.22	15	0.71
H	24	0.23	15	0.71
L	25	0.20	7.5	0.68
M	27	0.18	5	0.65



Tipo 3 – A=148 m²				
ASC	popolazione	NPWS	V ottimale(m³)	FURE
A	11	0.47	15	0.69
B	12	0.41	15	0.70
C	12	0.44	15	0.69
D	12	0.44	15	0.69
E	13	0.41	15	0.70
F	13	0.41	15	0.70
G	13	0.41	15	0.70
H	12	0.44	15	0.69
L	12	0.41	15	0.70
M	14	0.35	15	0.70



Tipo 4 – A=160 m²				
ASC	popolazione	NPWS	V ottimale(m³)	FURE
B	6	0.83	30	0.67
D	6	0.86	30	0.64
E	7	0.78	30	0.68
F	7	0.78	30	0.68
G	6	0.86	30	0.64
H	6	0.86	30	0.64
M	7	0.73	30	0.69

Tipo 5 – A=117 m²				
ASC	popolazione	NPWS	V ottimale(m³)	FURE
E	4	0.91	30	0.63
F	4	0.91	30	0.63
G	4	0.91	30	0.63
H	4	0.91	30	0.63
M	5	0.73	15	0.67

	Tipo 6 – A=82 m²				
	ASC	popolazione	NPWS	V ottimale(m³)	FURE
	E	2	0.99	15	0.49
	F	2	0.99	15	0.49
	G	2	0.99	15	0.49
	H	2	0.99	15	0.49
	M	2	0.99	15	0.53

4.5.2 Leggi empiriche

Le equazioni (4.1) e (4.2) sono leggi di tipo lineare. Introducendo i risultati della simulazione dell'RWH svolta nel capitolo presente, si possono scrivere un numero di equazioni superiore al numero di parametri da ricavare, ossia 3 (a, b, c) per la (4.1) e 2 (d, e) per la (4.2). Data questa ridondanza di equazioni non è possibile pervenire a soluzioni esatte, ma si può stimare il valore di tali parametri: un modo per farlo è quello di usare il metodo dei minimi quadrati. A questo scopo è stato costruito un codice in linguaggio *Matlab* che ha permesso di svolgere agevolmente le operazioni previste dal metodo.
Dopo aver stimato i parametri (a, b, c) l'equazione (4.1) diventa la seguente:

$$V_{ottimale}\ (m^3) = 7{,}9926 + 0{,}1224\ x\ Area\ del\ tetto\ (m^2) - 0.5015\ x\ abitanti \qquad (4.3)$$

Il segno dei coefficienti che moltiplicano l'area del tetto e gli abitanti confermano che la capacità ottimale cresce con l'aumentare dell'area del bacino e decresce con l'aumentare degli abitanti. Per verificare graficamente la bontà del modello, questa funzione a due variabili può essere rappresentata, assieme ai punti corrispondenti alle simulazioni, nel piano di fig. 30, in cui sono disegnate le curve di livello (rette) relative a diversi valori di capacità del serbatoio.

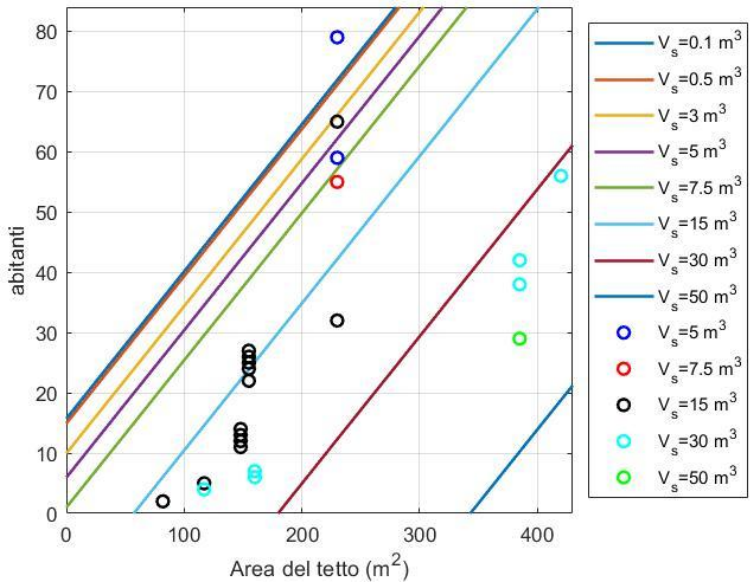


Fig. 30: *punti simulati e curve di livello del grafico della capacità del serbatoio in funzione dell'area del tetto e degli occupanti.*

Nonostante il gran numero di dati, la maggioranza di punti simulati sono relativi alle capacità di 15 e 30 m^3; l'allineamento dei punti sulle curve di livello non è preciso e il loro addensamento in alcune zone del grafico (ad esempio per i punti con capacità di 15 m^3) non consente di stabilire se il modello sia sufficientemente rappresentativo, tuttavia esso consente di spiegare alcuni comportamenti che generalizzano quanto visto nel paragrafo 4.2. Infatti, su questo grafico si può cercare il luogo dei punti in cui l'area pro capite (apc) è costante: essendo tale parametro il rapporto tra l'area del tetto e il numero di abitanti, esso è una retta con pendenza pari al reciproco di apc:

$$abitanti = \frac{area\ del\ tetto}{apc}$$

Scegliendo un certo numero di valori di apc, si possono rappresentare le rette corrispondenti (fig. 31, linee tratteggiate). Fin da subito si comprende come edifici con uguale apc possono avere capacità ottimali differenti in base ai valori di area e di abitanti che li caratterizzano: il parametro apc quindi è sufficiente per spiegare i differenti valori di NPWS ottimale, ma per spiegare le differenti capacità bisogna far riferimento sia all'area del tetto che agli abitanti e non solo al loro rapporto. L'unico caso in cui teoricamente basterebbe fare riferimento al solo parametro apc sarebbe quello rappresentato dalla retta parallela alle curve di livello del grafico V_s(area, abitanti), relativa al valore apc=4,1. Tuttavia, come si vede nella successiva fig. 32 solo una piccola quantità di edifici ha un valore di area pro capite prossimo o inferiore a 4,1, mentre i restanti hanno valori più alti, quindi, ipotizzando che il modello interpreti esattamente i risultati della simulazione, si può affermare che due edifici con stessa apc ma con aree diverse avranno capacità ottimali differenti: in particolare, per l'edificio con area maggiore la capacità ottimale sarà maggiore. Questa dipendenza della capacità ottimale dai due parametri *area del tetto* e *abitanti* e non solo dal loro rapporto, spiega ad esempio la differenza di comportamento che si è osservato nella fig. 26 tra l'edificio di tipo 4 e quello di tipo 5: in quel caso apc aumentava da 22,9 a 29,3, mentre l'area del tetto diminuiva da 160 a 117 m^2: come si può osservare sul grafico di fig. 31, sebbene il punto rappresentativo dell'edificio di tipo 5 si trovi su una retta con apc maggiore del tipo 4, l'area del tetto ne è inferiore al punto da far sì che la capacità ottimale sia inferiore.

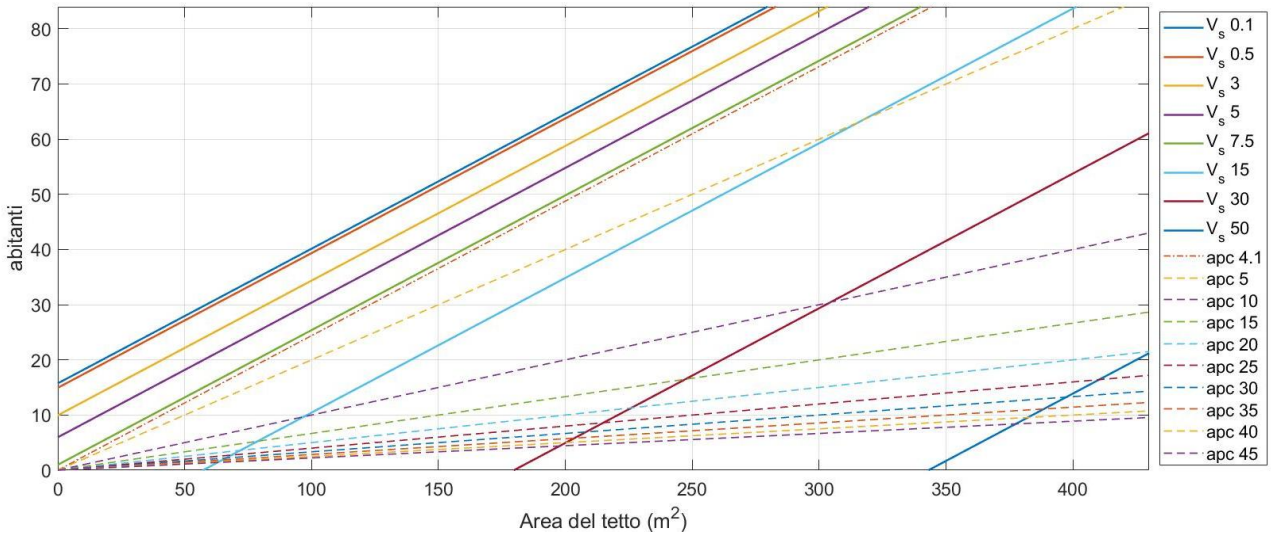


Fig. 31: *curve di livello della funzione V_{ott}(area tetto, abitanti) associate alle rette relative a diversi valori dell'area pro capite, tratteggiate; i valori di apc crescono in senso orario rispetto all'origine degli assi*

Per l'equazione (4.2) valgono le stesse considerazioni già discusse in precedenza riguardo alla ridondanza dei dati e all'utilizzo del metodo dei minimi quadrati. In questo caso il modello lineare è funzione di una sola variabile, quindi è più agevole rappresentarla in un grafico assieme ai punti corrispondenti ai risultati di ogni edificio (fig. 32). La legge numerica è la seguente:

$$NPWS\ (\%) = 9{,}2870 + 2{,}5121\ x\ Area\ pro\ capite\ (\ m^2/persona) \tag{4.1}$$

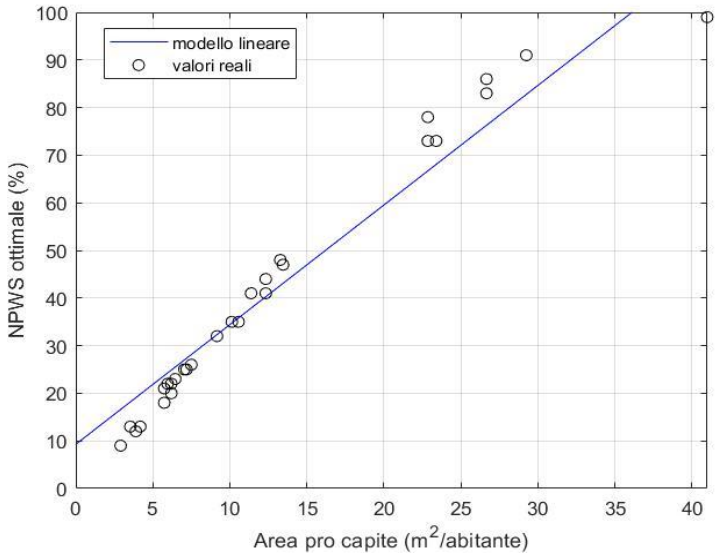


Fig. 32: *legge che rappresenta l'andamento dell'indice NPWS in funzione del rapporto tra l'area del tetto e il numero di abitanti*

L'equazione (4.1) può essere ricavata alternativamente mediante il programma MS Excel, in modo da poter confrontare i due risultati. Il grafico e l'equazione della linea che interpola i punti sono mostrati in fig. 33; l'indice R^2 è una misura della qualità della stima dei parametri ($R^2 = 1$ significherebbe un'ottima qualità).

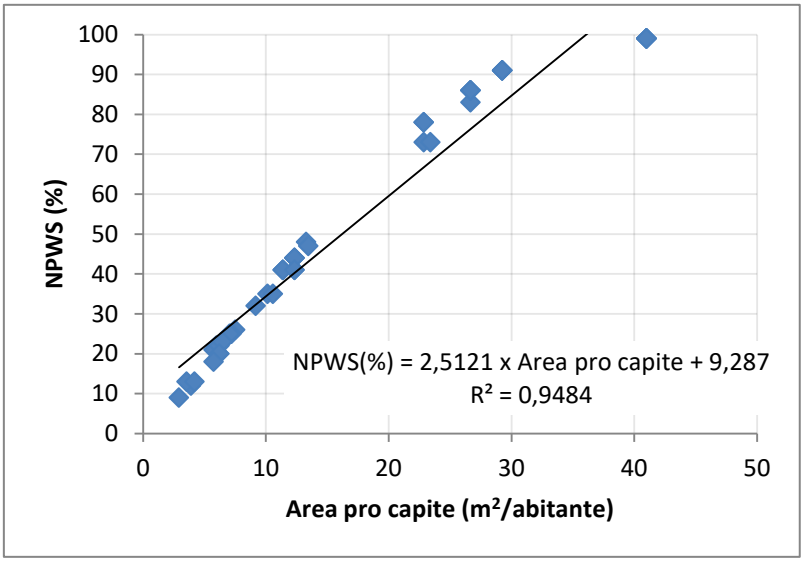


Fig. 33: *legge calcolata con il programma MS Excel, che rappresenta l'andamento dell'indice NPWS in funzione del rapporto tra l'area del tetto e il numero di abitanti; i punti sono i risultati della simulazione del funzionamento del serbatoio svolta nel presente capitolo.*

Si può notare che i punti relativi alla simulazione si addensano in una fascia stretta che va lievemente incurvandosi verso il basso con l'aumentare di apc: questa fascia si ritiene possa essere descritta in modo accettabile dalla retta del modello lineare proposto.
La fig. 32 (o la fig. 33) conferma un fatto già discusso nel capitolo 1: l'NPWS ottimale è tanto più grande quanto maggiore è il rapporto tra l'area del tetto e la popolazione dell'edificio, quindi un edificio tozzo ha un NPWS ottimale superiore a quello di un edificio snello.
Si ricorda che la simulazione del sistema di raccolta dell'acqua piovana che ha portato ai risultati discussi in questo capitolo si è basata su alcune ipotesi riguardanti i parametri utilizzati: nei capitoli successivi si analizzerà quindi l'influenza di tali parametri su una parte dei risultati, principalmente sull'NPWS di zona.

5 Analisi di sensitività

In questo capitolo ci si propone di simulare il funzionamento del serbatoio a servizio del sistema di raccolta della pioggia, considerando come nel capitolo 4 un periodo di riferimento pluriennale, bensì modificando alcuni parametri rispetto alla precedente simulazione, in modo da saggiarne l'influenza sui risultati. In particolare si vuole indagare l'influenza di:

- valori diversi per la domanda d'acqua non potabile (costante nel tempo)
- variazione temporale della domanda (due valori diversi all'interno della settimana)
- valori diversi del parametro a

Questi tre casi verranno affrontati separatamente, variando i valori dei parametri elencati uno alla volta, mentre l'offerta netta di pioggia (altezza di pioggia, coefficiente di deflusso e altezza di prima pioggia) rimangono invariati. La condizione iniziale è sempre quella di serbatoio vuoto.

5.1 Valori diversi per la domanda d'acqua

In questo paragrafo viene svolta la simulazione dell'RWH con domanda costante nel tempo. Vengono considerati quattro differenti valori per la domanda pro capite $d(litri/giorno \cdot abitante)$:

1. $d = 30$
2. $d = 40$
3. $d = 60$
4. $d = 70$

Nella tab. 43 sono riportati i valori di NPWS delle aree sub comunali.

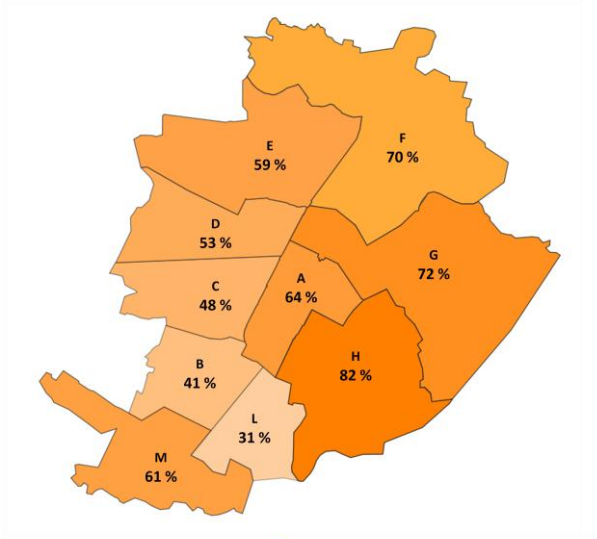
ASC	NPWS di zona			
	d = 30 l/g/ab	d = 40 l/g/ab	d = 60 l/g/ab	d = 70 l/g/ab
A	0.64	0.49	0.33	0.28
B	0.41	0.34	0.23	0.20
C	0.48	0.35	0.24	0.20
D	0.53	0.41	0.29	0.25
E	0.59	0.51	0.40	0.36
F	0.70	0.60	0.48	0.43
G	0.72	0.62	0.50	0.44
H	0.82	0.73	0.62	0.56
L	0.31	0.23	0.15	0.13
M	0.61	0.54	0.43	0.38

Tab. 43: *NPWS di zona ottenuto con diversi valori di domanda non potabile pro capite*

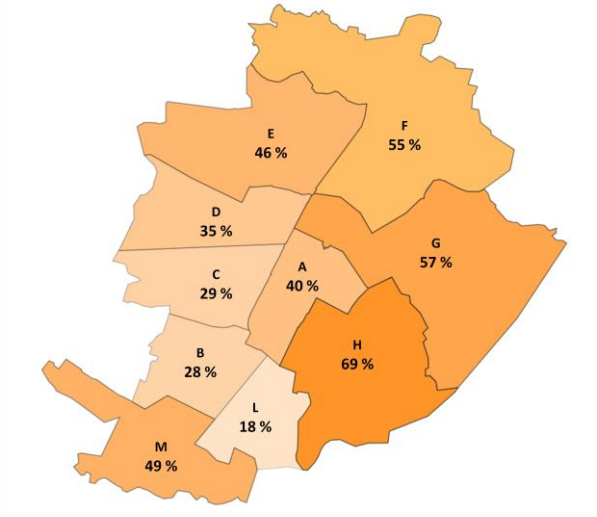
Per poter osservare meglio le differenze si possono confrontare le mappe dell'NPWS frutto dei diversi valori della domanda. Nella fig. 34 vengono messi a confronto, con l'aiuto delle diverse

intensità del colore, i valori di NPWS generati dalle domande estreme (30 e 70 l/g/ab) e dalla domanda di 50 l/g/ab, utilizzata nel capitolo 4.

d=30 l/g/abitante



d=50 l/g/abitante



d=70 l/g/abitante

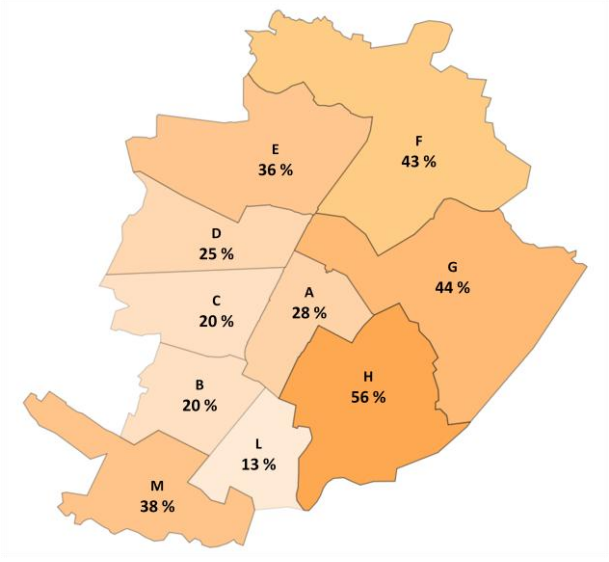


Fig. 34: *dall'alto verso il basso sono state rappresentate le mappe dell'NPWS al variare della domanda non potabile pro capite*

L'andamento dell'NPWS di zona in funzione della domanda pro capite viene mostrato più chiaramente nella fig. 35: il grafico unisce i valori presentati nella tab. 43 a quelli della simulazione principale (capitolo 4).

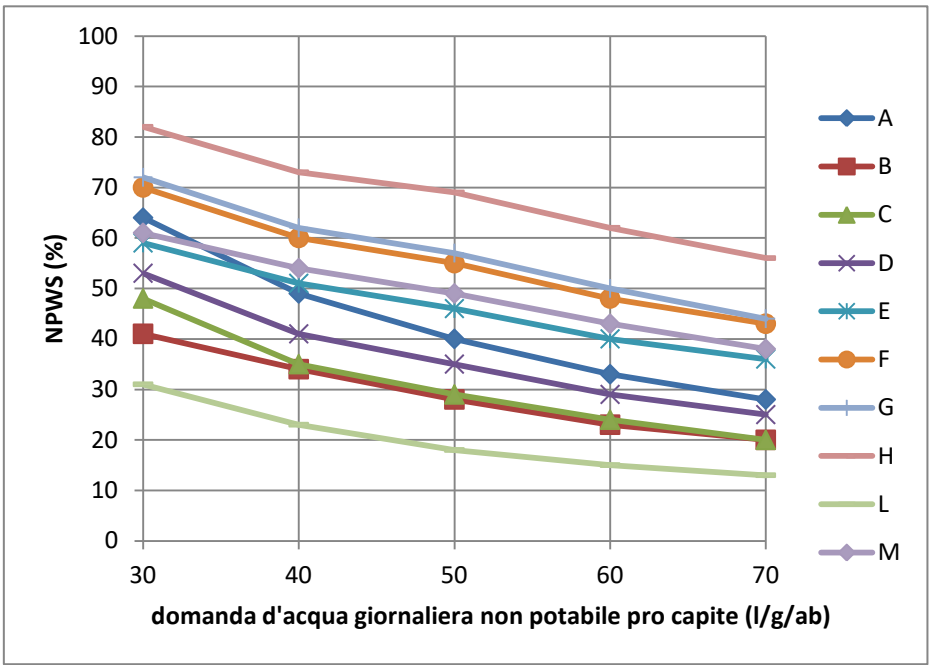


Fig. 35: *andamento dell' NPWS di zona al variare della domanda non potabile pro capite. Ogni linea si riferisce a un'area sub comunale.*

Il risultato ovvio è che l'indice NPWS di zona decresce coll'aumentare della domanda pro capite. Si noti come la pendenza della decrescita è simile per tutte le ASC e pari a circa 6-7 punti percentuali ogni dieci litri di incremento della domanda.

5.2 Domanda d'acqua variabile nella settimana

In questo paragrafo si vuole valutare se la costanza nel tempo della domanda pro capite sia un'assunzione influente sui risultati. Per capirlo, si utilizza un andamento settimanale semplificato della domanda, in modo da considerare solo due valori, uno per la settimana lavorativa (lunedì-venerdì) e l'altro per il fine-settimana (sabato e domenica). I due valori sono scelti in modo da valutare esclusivamente la distribuzione settimanale, che rimane comunque contenuta, e mantenere il valore medio, pari a 50 litri, uguale alla domanda utilizzata nella simulazione principale.
I due valori settimanali della domanda non potabile pro capite $d(litri/giorno \cdot abitante)$ sono:

- $d = 45$ da lunedì a venerdì
- $d = 62.5$ per il sabato e la domenica

Si ricorda che la simulazione è svolta su base pluriennale e che la condizione iniziale è di serbatoio vuoto. I valori di NPWS ottenuti sono gli stessi che ha prodotto la simulazione principale, con domanda d'acqua pro capite costante, pari a 50 litri/giorno/abitante.

5.3 Parametro *a* : area di Mirafiori Sud

Il parametro *a* è la frazione del volume totale di pioggia di una giornata che è stato raccolto prima del prelievo da parte degli abitanti dell'edificio: per capire la sua influenza sui risultati vengono considerati quattro valori diversi di *a*, oltre a quello già usato nella simulazione principale.
Per quanto riguarda i valori estremi che può assumere, il valore *a*=0 significa che al momento del prelievo non è ancora stato inviato al serbatoio alcun volume d'acqua piovana; all'opposto, *a*=1 significa che tutto il volume d'acqua che viene raccolto nella giornata *i*-esima, è stato inviato al serbatoio prima del prelievo. Si ricorda, come già detto quando è stato introdotto questo parametro nel paragrafo 2.1, che tra il volume inviato al serbatoio e la reale disponibilità di acqua per l'utenza, intercorre la capienza del serbatoio stesso e quindi la possibilità di tracimazione.
In questo paragrafo si fa riferimento alla sola area sub comunale M (Mirafiori Sud). La simulazione ha periodo di riferimento pluriennale con domanda costante pari a 50 litri / g / abitante e la condizione iniziale è di serbatoio vuoto: ciò significa che è esattamente uguale alla simulazione principale, varia soltanto il parametro *a*.
I risultati, in termini di NPWS, capacità ottimale del serbatoio, FURE e NPWS di zona sono raccolti nella tab. 44.

a	Tipo edificio	1C	6	5	3	4	2
0	NPWS	0,10	0,99	0,73	0,35	0,73	0,18
	V (m³)	15,00	15,00	15,00	15,00	30,00	7,50
	FURE	0,70	0,53	0,67	0,70	0,69	0,67
	NPWS di zona	0.49					
0.25	NPWS	0,09	0,99	0,73	0,35	0,73	0,18
	V (m³)	7,50	15,00	15,00	15,00	30,00	7,50
	FURE	0,68	0,53	0,67	0,70	0,69	0,68
	NPWS di zona	0.49					
0.5 (valore di riferimento)	NPWS	0,09	0,99	0,73	0,35	0,73	0,18
	V (m³)	5,00	15,00	15,00	15,00	30,00	5,00
	FURE	0,66	0,53	0,67	0,70	0,69	0,65
	NPWS di zona	0.49					
0.75	NPWS	0,09	0,99	0,73	0,35	0,73	0,18
	V (m³)	7,50	15,00	15,00	15,00	30,00	5,00
	FURE	0,68	0,53	0,67	0,70	0,69	0,65
	NPWS di zona	0.49					
1	NPWS	0,10	0,99	0,73	0,35	0,73	0,18
	V (m³)	15,00	15,00	15,00	15,00	30,00	7,50
	FURE	0,70	0,53	0,67	0,70	0,69	0,67
	NPWS di zona	0.49					

Tab. 44: *risultati della simulazione pluriennale per l'area sub comunale M, al variare del parametro a*

L'influenza del parametro *a* è decisamente piccola. Per giustificare questo aspetto, si tenga presente che il volume d'acqua non utilizzato nella giornata *i*-esima può essere prelevato nella

giornata successiva (i+1-esima). Questo fa sì che il parametro a generi soltanto uno sfasamento temporale tra l'istante del prelievo e quello della disponibilità, ma non una significativa differenza sui volumi cumulati nell'intero periodo di riferimento.

6 Simulazione annuale: area di Mirafiori Sud

In questo ultimo capitolo si vuole modificare il periodo di riferimento sul quale si svolge la simulazione: finora infatti è stato considerato un periodo pluriennale, ossia l'intera serie di anni di cui si possiedono le misurazioni di pioggia. Si vuole ora comprendere quali sarebbero i risultati, in termini di NPWS, FURE e capacità ottimale del serbatoio, se la simulazione del funzionamento del serbatoio venisse svolta con un periodo di riferimento annuale: per questo motivo, indicando con la lettera *m* il generico anno, viene svolta la simulazione per ognuno degli *m* anni di cui si possiedono le misure di precipitazione, coprendo quindi tutto il periodo utilizzato per la simulazione pluriennale. La simulazione verte sulla sola area sub comunale M, ossia il quartiere di Mirafiori Sud; la stazione meteorologica di riferimento è "Vallere", che possiede 18 anni di misurazioni di altezza di pioggia: di conseguenza verranno svolte 18 simulazioni. Riguardo la condizione iniziale da fissare per ogni anno simulato, si analizzeranno due scenari differenti: il primo, chiamato "funzionamento interrotto" prevede che il serbatoio venga svuotato alla fine di ogni anno e quindi che la condizione iniziale di ogni simulazione sia di *serbatoio vuoto*, ossia $V_i(1)=0$ per ognuno degli *m* anni della serie; il secondo scenario, chiamato "funzionamento continuo" prevede invece la continuità di utilizzo del sistema nel passaggio da un anno all'altro: in questo caso ogni simulazione dipende dalla precedente, in quanto il volume d'acqua contenuto nel serbatoio a fine anno (anno *m*) diventa il volume iniziale della simulazione successiva (anno *m+1*), quindi $V_i(1)|_{m+1}=V_f(365)|_m$, dove 365 indica l'ultimo giorno dell'anno. In entrambi i casi il volume iniziale del primo anno è comunque nullo.
Come per la simulazione principale (capitolo 4), la domanda giornaliera non potabile pro capite è considerata pari a 50 litri e il parametro *a* uguale a 0,5.
Per ogni edificio vengono calcolati:

- NPWS ottimale
- capacità ottimale del serbatoio
- FURE corrispondente alla capacità ottimale

Le 18 simulazioni portano alla luce altrettanti valori di $NPWS_{ott}$, FURE, capacità ottimale, diversi di anno in anno. Per poter fare un confronto tra questi risultati e quelli ottenuti con la simulazione pluriennale, dai 18 risultati per ogni parametro, vengono estratti la media, lo scarto quadratico medio e il coefficiente di variazione, ossia il rapporto tra lo SQM e la media, in modo da avere anche una misura della variabilità dei risultati tra anni differenti.
Di seguito (fig. 36) è riportato il grafico dei totali annui di pioggia, in quanto è utile osservare il rapporto causale tra questo andamento e quello dell'NPWS, che si potrà osservare nei grafici successivi.

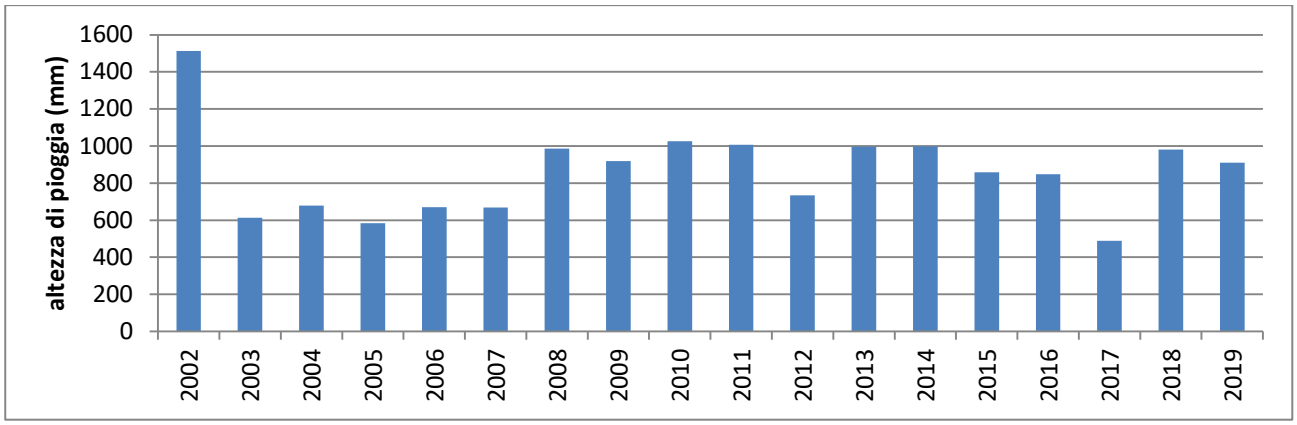
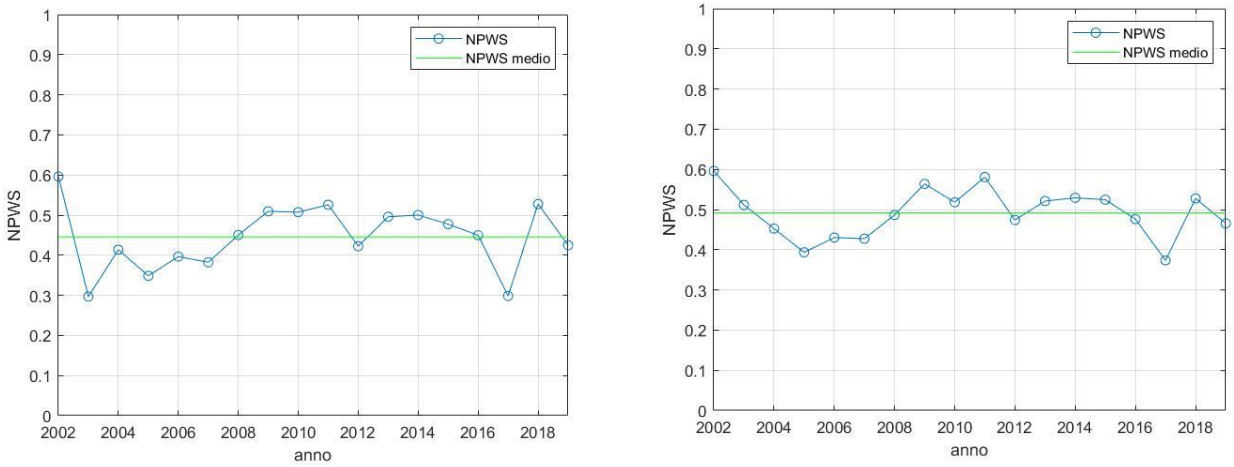


Fig. 36: *totali annui di precipitazione della stazione Vallere di Torino*

Di seguito vengono esposti i risultati delle simulazioni annuali nei due scenari di funzionamento interrotto o continuo del sistema.
Nella seguente fig. 37 viene presentato l'andamento dell'NPWS di zona nel tempo: i punti rappresentano i risultati delle 18 simulazioni, mentre la linea verde ne indica il valore medio.



funzionamento interrotto **funzionamento continuo**

Fig. 37: *andamento negli anni dell'indice NPWS di zona dell'ASC M nel caso di funzionamento interrotto del sistema (svuotamento del serbatoio a fine anno) o nel caso di funzionamento continuo*

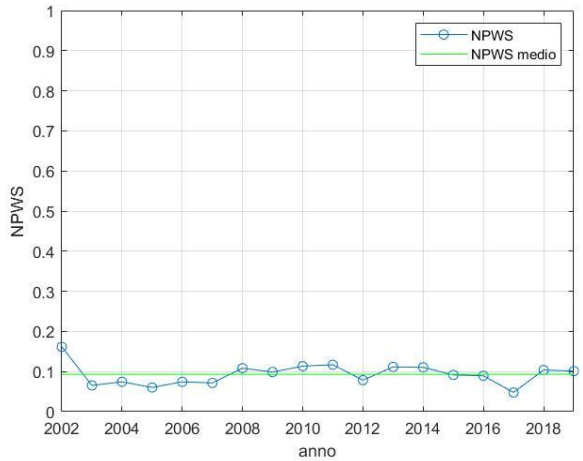
Tipo di funzionamento	Media	SQM	CV
interrotto	0,45	0,08	0,18
continuo	0,49	0,06	0,12

Tab. 45: *media, scarto quadratico medio e coefficiente di variazione dell'NPWS di zona dell'ASC M, per i due scenari analizzati*

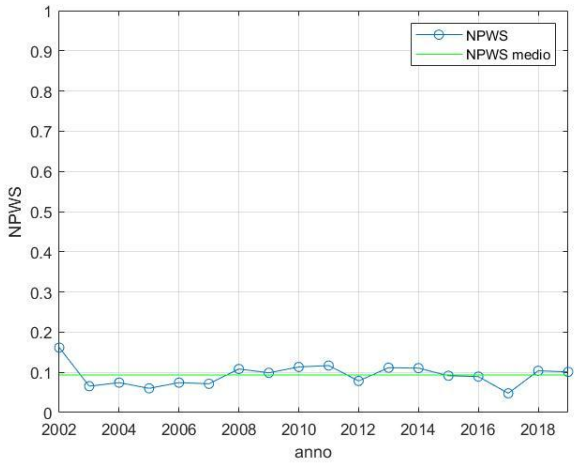
Nelle seguenti tabelle, una per ogni edificio, viene mostrato l'andamento dell'$NPWS_{ott}$ nel tempo, associato al suo valore medio, allo scarto quadratico medio e al coefficiente di variazione; per l'indice FURE e per la capacità ottimale vengono riportati gli stessi risultati, tranne gli andamenti temporali.

Tipo 1C

Funzionamento interrotto



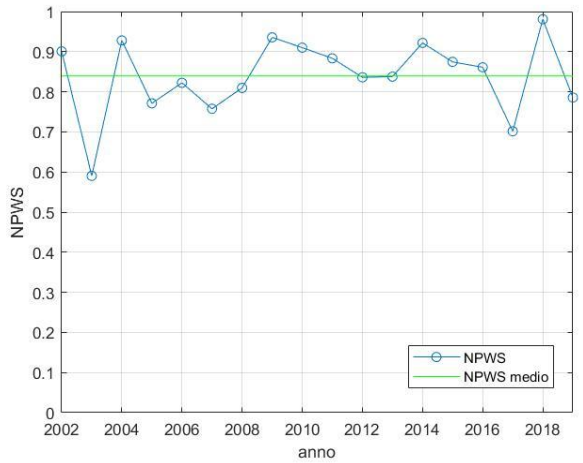
Funzionamento continuo



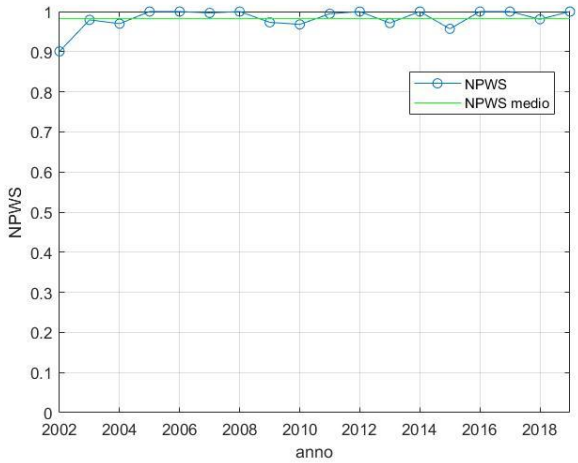
		Media	SQM	CV
Funzionamento interrotto	$NPWS_{ott}$	0.09	0.03	0.29
	Volume ottimale (m^3)	7.25	4.33	0.60
	FURE	0.68	0.02	0.04
Funzionamento continuo	$NPWS_{ott}$	0.09	0.03	0.29
	Volume ottimale (m^3)	7.25	4.33	0.60
	FURE	0.68	0.02	0.04

Tipo 6

Funzionamento interrotto



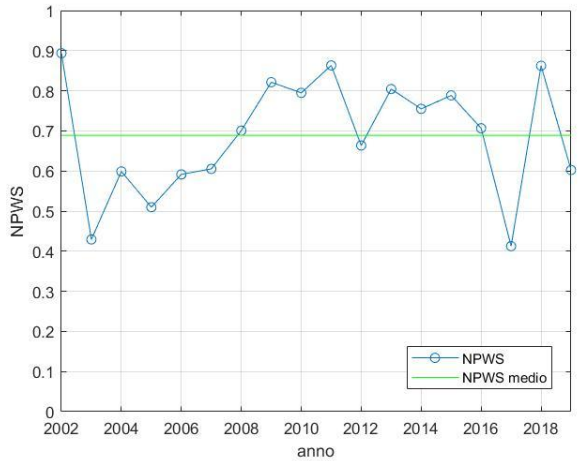
Funzionamento continuo



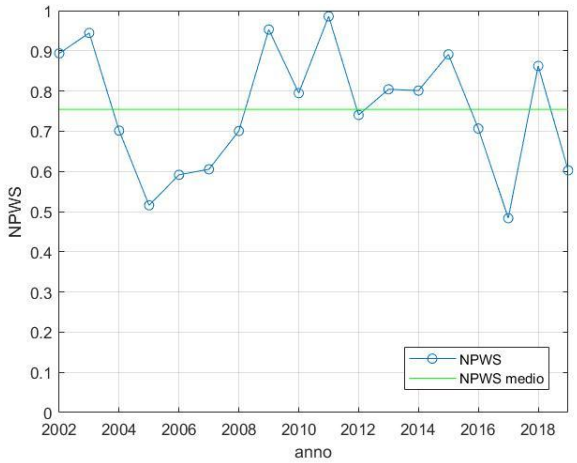
		Media	SQM	CV
Funzionamento interrotto	$NPWS_{ott}$	0.84	0.09	0.11
	Volume ottimale (m^3)	4.47	1.22	0.27
	FURE	0.48	0.09	0.19
Funzionamento continuo	$NPWS_{ott}$	0.98	0.03	0.03
	Volume ottimale (m^3)	9.92	5.31	0.54
	FURE	0.54	0.13	0.23

Tipo 5

Funzionamento interrotto



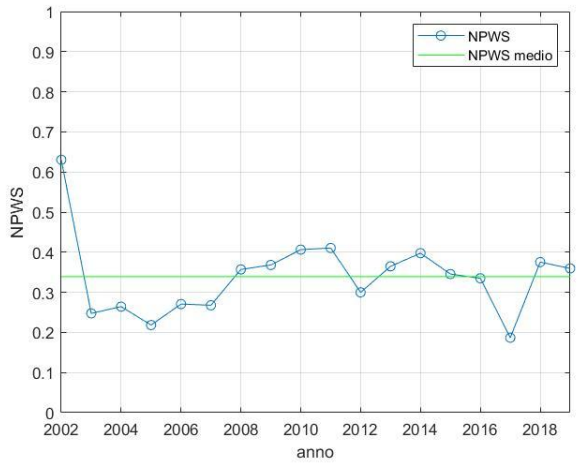
Funzionamento continuo



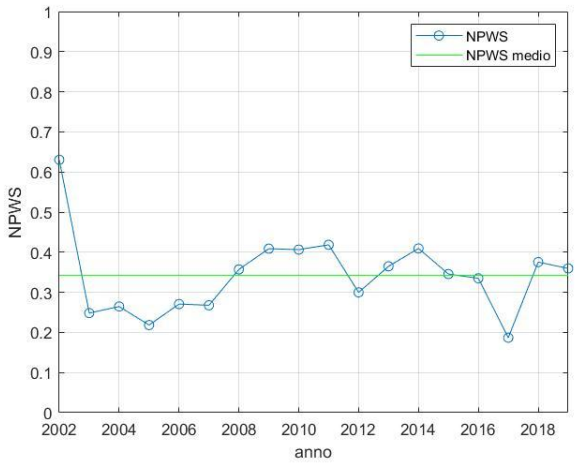
		Media	SQM	CV
Funzionamento interrotto	$NPWS_{ott}$	0.69	0.15	0.21
	Volume ottimale (m^3)	12.22	4.10	0.34
	FURE	0.66	0.07	0.10
Funzionamento continuo	$NPWS_{ott}$	0.75	0.15	0.20
	Volume ottimale (m^3)	16.39	9.79	0.60
	FURE	0.66	0.06	0.10

Tipo 3

Funzionamento interrotto



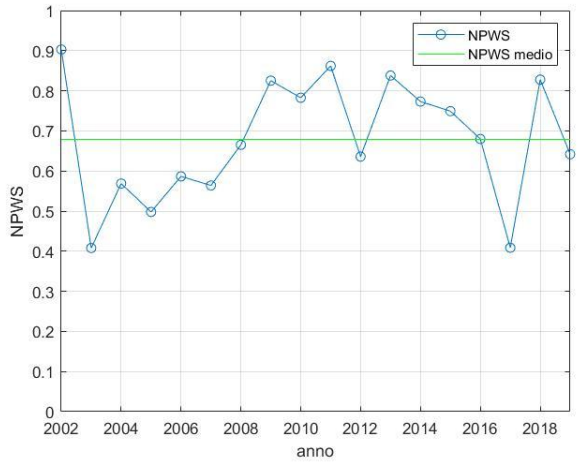
Funzionamento continuo



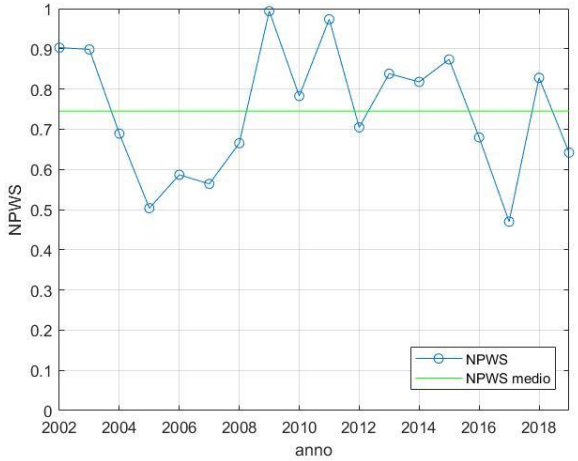
		Media	SQM	CV
Funzionamento interrotto	$NPWS_{ott}$	0.34	0.10	0.29
	Volume ottimale (m^3)	9.58	4.04	0.42
	FURE	0.68	0.02	0.04
Funzionamento continuo	$NPWS_{ott}$	0.34	0.10	0.29
	Volume ottimale (m^3)	10	4.20	0.42
	FURE	0.68	0.03	0.04

Tipo 4

Funzionamento interrotto



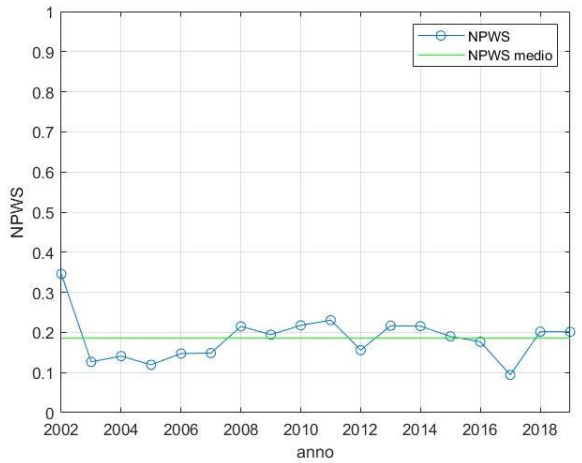
Funzionamento continuo



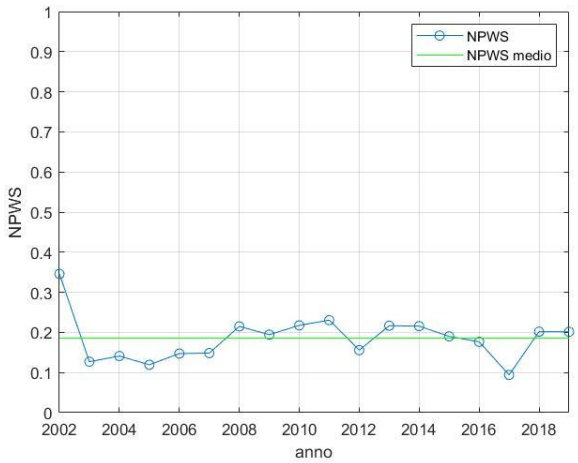
		Media	SQM	CV
Funzionamento interrotto	$NPWS_{ott}$	0.68	0.15	0.22
	Volume ottimale (m^3)	17.36	7.50	0.43
	FURE	0.66	0.06	0.09
Funzionamento continuo	$NPWS_{ott}$	0.75	0.15	0.20
	Volume ottimale (m^3)	16.39	9.79	0.60
	FURE	0.66	0.06	0.10

Tipo 2

Funzionamento interrotto



Funzionamento continuo



		Media	SQM	CV
Funzionamento interrotto	$NPWS_{ott}$	0.19	0.06	0.30
	Volume ottimale (m^3)	7.97	4.65	0.58
	FURE	0.68	0.03	0.04
Funzionamento continuo	$NPWS_{ott}$	0.19	0.06	0.30
	Volume ottimale (m^3)	7.97	4.65	0.58
	FURE	0.68	0.03	0.04

I valori di NPWS ottimale e di NPWS di zona che si ottengono per ogni anno simulato dipendono ovviamente dalla quantità di pioggia cumulata nell'anno (fig. 36): gli anni più secchi portano a valori più bassi dell'indice mentre gli anni più umidi conducono a valori più alti di NPWS ottimale.
I risultati mostrano che lo svuotamento del serbatoio a fine anno e cioè la perdita di tale quantità d'acqua porta coerentemente a un indice NPWS ottimale minore rispetto al funzionamento continuato: questo risultato è però evidente solo per gli edifici tozzi, mentre per gli edifici snelli i risultati sono praticamente uguali per i due diversi scenari. La variabilità, misurata dallo scarto quadratico medio e dal coefficiente di variazione è simile nei due scenari per quasi tutti gli edifici, mentre per l'edificio di tipo 6 è molto minore nel caso di funzionamento continuo.
Si passa ora a confrontare i risultati delle simulazioni annuali con la simulazione pluriennale principale (capitolo 4).
La simulazione pluriennale principale produceva, per l'area sub comunale M, un NPWS di zona pari a 0,49. Le simulazioni annuali con funzionamento continuato portano ad un NPWS medio uguale (a meno dei centesimi) a quello prodotto dalla simulazione pluriennale principale, mentre le simulazioni annuali con funzionamento interrotto conducono ad un valore più basso dell'NPWS. Ciò è coerente: nella simulazione pluriennale la distinzione annuale non esiste, quindi il volume contenuto nel serbatoio a fine anno, avendo la stessa importanza del volume contenuto in qualsiasi altra giornata, non viene perso e diventa la condizione iniziale del giorno successivo, pertanto è coerente che il valor medio degli NPWS delle simulazioni annuali con funzionamento continuato sia il più vicino all'indice NPWS della simulazione pluriennale principale.
Riguardo la variabilità dei risultati, nel caso di NPWS di zona essa è inferiore per le simulazioni con funzionamento continuato rispetto a quelle con funzionamento interrotto.
I risultati ottenuti in questo capitolo sono relativi a un caso particolare, l'area sub comunale M, tuttavia è probabile che anche per le altre aree si giungerebbe alla conclusione che le simulazioni annuali con funzionamento continuato portano ad un NPWS di zona simile al quello ottenuto con la simulazione pluriennale.

7 Stima del risparmio e dei costi

In questo capitolo si vuole analizzare il risparmio generato dal recupero dell'acqua piovana in termini economici, in modo da poterlo confrontare con il costo necessario a installare e gestire l'impianto idraulico di raccolta e distribuzione dell'acqua piovana all'interno dell'edificio. Come è stato scritto nel paragrafo 1.3, se il serbatoio venisse posto a livello del piano del terreno o interrato, sarebbe necessario installare una pompa, mentre se esso venisse posto ad una quota superiore a quella dell'utenza più elevata, la pompa potrebbe non servire. La pompa è messa in moto da un motore elettrico: va da sé quindi che il risparmio di acqua potabile, dato dal volume d'acqua che non viene prelevato dagli abitanti dell'edificio, nel caso in cui serva la pompa, viene bilanciato dal costo dell'energia elettrica consumata. In ogni caso, per fare in modo che ogni appartamento di un edificio residenziale esistente venga rifornito di acqua non potabile, devono essere posati nuovi tubi e modificato l'impianto esistente nella zona del bagno, dove si trovano il w.c. e solitamente la lavabiancheria ed eventualmente la zona del balcone, dove può essere installato un rubinetto per attingere acqua piovana per altri scopi. Questi lavori di ristrutturazione si può intuire come possano essere molto costosi, comportando importanti lavori edili, quali la demolizione e la ricostruzione di pavimenti e rivestimenti murari. L'impianto in sé ha un costo di acquisto e installazione: oltre al serbatoio e alla pompa sono necessari altri dispositivi che ne permettono il funzionamento, come la cassa d'aria (che assieme alla pompa formano l'insieme detto *autoclave*), la tubazione succursale che alimenta l'impianto con acqua potabile prelevata dall'acquedotto, l'impianto elettrico necessario per alimentare il motore della pompa e i dispositivi che ne gestiscono l'accensione e lo spegnimento qualora il livello nel serbatoio sia troppo basso e che nel contempo attivano la tubazione succursale di acqua potabile. Oltre all'installazione e al consumo di energia, andrebbe previsto un costo di manutenzione, quantomeno per la pulizia periodica del filtro che trattiene la parte grossolana del materiale indesiderato proveniente dal tetto.
Di seguito verrà analizzato ognuno dei nove tipi di edificio rappresentativo nel caso più svantaggioso, quello cioè in cui il serbatoio sia interrato e sia quindi necessaria la pompa: per ogni edificio verrà dimensionato in modo speditivo l'impianto idraulico non potabile e verrà scelta una pompa di potenza adeguata alle sue esigenze. Ogni edificio verrà poi calato all'interno della sua realtà territoriale, ossia l'area sub comunale di sua appartenenza, che caratterizza il tipo di edificio con un particolare valore della capacità ottimale del serbatoio e del volume d'acqua piovana recuperato. I costi e i risparmi che verranno considerati in questa analisi sono solo una parte di quelli reali, quella che si ritiene preponderante; il periodo di tempo a cui ci si riferisce è di un anno, fatti salvi ovviamente i costi iniziali di installazione. I costi e i risparmi considerati nell'analisi sono i seguenti:

- risparmio di acqua, funzione del volume medio annuo risparmiato dall'edificio
- costo dell'energia consumata dalla pompa, funzione della potenza assorbita e del tempo di funzionamento della pompa in un anno
- costo del serbatoio
- costo di posa dell'impianto idraulico e i connessi lavori edili, considerato come un valore costante per ogni appartamento dell'edificio

Il costo dell'acqua viene dedotto dai documenti consultabili per via informatica dell'Autorità d'ambito 3 Torinese [14]: è stato considerato il solo costo variabile del servizio di distribuzione dell'acqua potabile, in particolare un valore approssimativamente medio tra le

tariffe "base" e "prima eccedenza", pari a 1€/m³; la ragione della scelta sta nel fatto che il valore del consumo potabile pro capite, ridotto a causa dell'uso di acqua piovana, ricade, per qualsiasi edificio, nelle due fasce di consumo "base" e "prima eccedenza".
Il costo unitario dell'energia è stato dedotto dalla consultazione di alcune bollette emesse negli anni 2019-2020, rapportando il prezzo della bolletta all'energia consumata: esso è pari a 0,25 €/kWh.
Sono stati cercati i prezzi di serbatoi commerciali con capacità uguale o simile a quelle desiderate e sono stati adottati quelli dell'azienda Rewatec [15], che vengono arrotondati per eccesso:

- 5 m³ 2500 €
- 7,6 m³ 3500 €
- 15 m³ 6000 €
- 30 m³ 11000 €
- 50 m³ 18000 €

Infine, il costo della posa dell'impianto viene stimato essere pari a 2000 € per ogni appartamento: in questo costo vengono fatte rientrare le spese per l'acquisto dei materiali per i lavori edili, le tubature, l'impianto elettrico e la pompa; i costi di manutenzione non vengono presi in considerazione.

Dimensionamento dell'impianto

Il consumo annuo di energia elettrica della pompa (E, espressa in kilowattora, kWh) viene stimato come prodotto tra la sua potenza (espressa in kilowatt, kW) e il tempo annuo (espresso in ore, h) in cui essa è attiva:

$$E\ (kWh) = P\ \cdot t$$

Per stabilire quanto valga la potenza della pompa è necessario dimensionare l'impianto e valutare le perdite di carico; per quanto riguarda il tempo di funzionamento, viene stimato come rapporto tra il volume annuo medio di acqua piovana utilizzato dal generico edificio k (paragrafo 4.4, tab. 42) e la portata richiesta dagli abitanti dell'edificio stesso ($Q_{progetto,\,k}$). Al netto del coefficiente necessario a tener conto delle differenti unità di misura, la formula è la seguente:

$$t = \frac{V_{risp,annuo\ medio,k}}{Q_{progetto,k}}$$

Per ognuno dei nove tipi di edificio considerati nei calcoli dei capitoli precedenti, viene costruito un modello semplice dell'impianto idraulico non potabile, fissando una volta per tutte alcune misure: la quota del pelo libero del serbatoio e del suo piano di posa; la quota della pompa; la lunghezza del tubo che unisce serbatoio e pompa; la quota dell'utenza più svantaggiata rispetto al solaio dell'appartamento a cui appartiene; la distanza tra la colonna montante idraulica che serve gli appartamenti e l'apparecchio più distante da essa, chiamata c e considerata maggiore negli edifici tozzi di grandi dimensioni (tipi 1A, 1B) rispetto agli altri edifici. Tutte queste misure sono mostrate in fig. 38. Riguardo la pompa, se ne adotta un tipo a giri costanti associato ad un serbatoio in pressione (cassa d'aria) che permetta il suo buon funzionamento. La linea succursale alimentata dall'acquedotto si innesta nell'impianto non potabile a valle della cassa d'aria (si veda la fig. 38) e viene aperta solo nel caso in cui non sia presente acqua piovana nel serbatoio. A livello di ogni piano è presente una diramazione a "T" alla quale si innestano i due impianti interni agli appartamenti di quel piano; nel caso di edifici con più di due appartamenti per piano, è comunque presente una diramazione, dalla quale

questa volta partono le tubazioni che portano l'acqua agli appartamenti più distanti dalla colonna montante idraulica.
Per ogni appartamento si ipotizza che gli apparecchi serviti dall'impianto non potabile siano quelli elencati di seguito, ai quali viene associata la portata minima da garantire e l'unità di carico (UC) stabilite dalla norma UNI 9182:

- uno sciacquone del w.c. a cassetta: 0,1 l/s, 3 UC
- una macchina lavabiancheria: 0,15 l/s, 2 UC
- un rubinetto per scopi vari, assimilabile ad un lavello da cucina: 0,15 l/s, 1,5 UC.

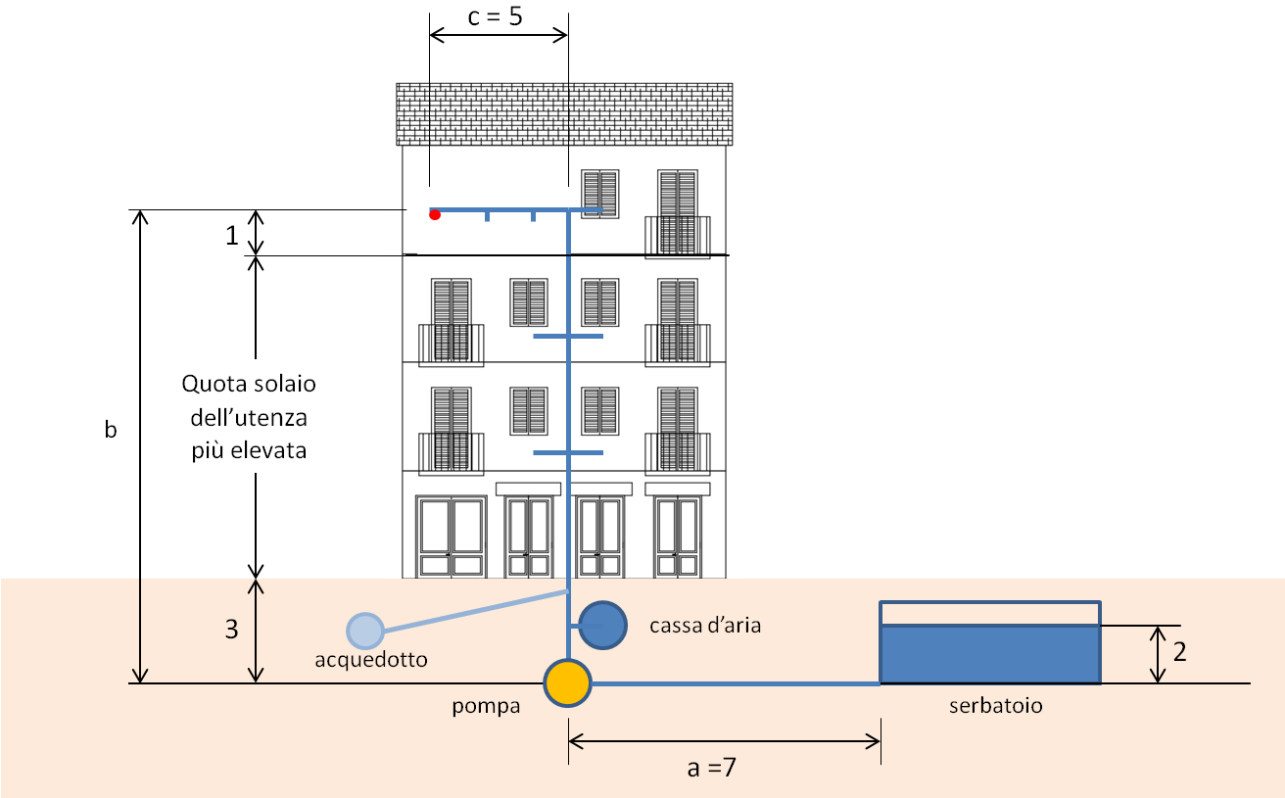


Fig. 38. *Esempio dell'edificio di tipo 3: schema dell'impianto idraulico di distribuzione dell'acqua piovana, con l'indicazione dei principali componenti e delle misure*

Il procedimento speditivo usato per dimensionare l'impianto e quindi la pompa prevede di non distinguere i tratti di tubo attraversati da portate via via inferiori salendo verso i piani superiori, ma di assumere che l'intera portata di progetto percorra tutta la tubazione illustrata in fig. 38 dal serbatoio fino all'apparecchio più svantaggiato, ossia quello posto alla quota maggiore e per il quale la lunghezza che deve percorrere l'acqua dentro alla tubatura è la maggiore: questo apparecchio è rappresentato dal punto rosso nella fig. 38. Questa assunzione è cautelativa, poiché la diminuzione della portata che si verifica nella realtà salendo verso i piani alti fa sì che la perdita di carico distribuita decresca lungo il percorso dell'acqua: ciò permetterebbe quindi di usare una pompa con prevalenza inferiore (e quindi potenza inferiore) a quella che verrà scelta alla fine di questo calcolo.
La portata di progetto viene individuata calcolando la somma di tutte le unità di carico che deve fornire la pompa (prodotto tra le unità di carico di un appartamento e il numero degli appartamenti); successivamente, mediante il grafico delle norme UNI 9182 si ottiene la

portata di progetto, che tiene conto della scarsa probabilità dei prelievi simultanei d'acqua di tutti gli abitanti dell'edificio.
Il diametro del tubo, fatto d'acciaio, si assume essere costante lungo tutto il percorso e la sua scabrezza superficiale si ipotizza essere pari a 0,3 mm, tipica di "tubi in servizio corrente con leggera ruggine" (Marchi et al, [16]), equivalente ad un coefficiente di Strickler k_s=90 $m^{1/3}/s$.
Adottando per ogni edificio un diametro commerciale che consente di tenere sotto controllo le velocità del flusso, per mezzo della formula di Colebrook e White si ricava il valore della cadente piezometrica e di conseguenza, considerando la lunghezza del tubo pari alla somma delle tre componenti *a*, *b* e *c* (fig. 38), si calcolano le perdite di carico distribuite.
Riguardo invece le perdite di carico concentrate, è noto che negli impianti domestici esse sono una quota importante delle perdite di carico complessive, poiché sono generate dalle numerose curve e diramazioni che il flusso incontra nel suo percorso. Per tenerne conto in modo semplice, si assume che ad ogni piano il flusso incontri una diramazione e che globalmente esso incontri quattro curve tra il serbatoio e l'utenza più svantaggiata; si assume inoltre (fig. 38) che il fluido incontri due ulteriori diramazioni all'interno dell'appartamento a cui appartiene l'utenza più svantaggiata. Il valore delle perdite di carico è usualmente definito come una quantità proporzionale all'altezza cinetica del fluido e il coefficiente di proporzionalità dipende dal particolare tipo di elemento dissipativo. Questi coefficienti vengono tratti da un "Quaderno Caleffi" che riguarda le perdite di carico [17]: essi valgono, per le diramazioni a "T" e le curve "normali", rispettivamente 1 e 0,5.
Infine, la prevalenza della pompa viene calcolata come somma del dislivello altimetrico, delle perdite di carico complessive e di un margine, ossia un'altezza piezometrica minima da garantire all'apparecchio più svantaggiato, che la norma UNI 9182 stabilisce essere pari a 10 metri d'acqua.
Considerando i valori della portata $Q_{progetto}$ e della prevalenza *H*, è possibile scegliere la pompa adeguata. Per farlo viene consultato un catalogo di pompe a giri costanti della ditta Lowara [18], nel quale sono presenti le curve caratteristiche H(Q) di un notevole numero di pompe: il modello viene scelto cercando la curva caratteristica che più si avvicina al punto di funzionamento desiderato (Q,H). Nel catalogo è riportato il valore della potenza assorbita dalle pompe, che viene assunta come potenza di riferimento per i calcoli successivi.
Le successive tabelle mostrano le assunzioni fatte e i risultati ottenuti dal calcolo idraulico, per ognuno dei nove tipi di edificio.

Tipo di edificio	1A	1B	1C	1D
L_{tubo} interno appartamento, c (m)	10	10	5	5
Quota solaio utenza più elevata (m)	19,5	15	32,5	25,5
Diametro (pollici)	2"	2"	2"	2"
Q (l/s)	3,5	4,7	4,7	3
Prevalenza (m)	35,5	33,4	53,7	40,8
Potenza della pompa (kW)	2,22	2,59	5,10	2,22

Tab. 46: *dati necessari al calcolo idraulico e risultati ottenuti per gli edifici di classe 1*

Tipo di edificio	2	3	4	5	6
L_{tubo} interno appartamento, c (m)	5	5	5	5	5
Quota solaio utenza più elevata (m)	18,3	10,5	4	4,5	3,7
Diametro (pollici)	1"½	1"¼	1"	¾"	½"
Q (l/s)	2,4	1,5	0,9	0,6	0,4
Prevalenza (m)	35,9	25,6	19,9	40,8	24,1
Potenza della pompa (kW)	1,83	1,07	0,57	0,52	0,56

Tab. 47: *dati necessari al calcolo idraulico e risultati ottenuti per gli edifici di tipo da 2 a 6*

A questo punto ogni edificio viene calato all'interno della sua area sub comunale: si considerano i volumi medi annui di acqua piovana utilizzata, il cui rapporto con la portata di progetto è pari alla stima del tempo di funzionamento della pompa. La potenza della pompa viene di conseguenza moltiplicata per il tempo di funzionamento al fine di conoscere l'energia elettrica consumata annualmente dalla pompa.
Riguardo il costo del serbatoio, anche in questo caso la realtà territoriale influenza il risultato, poiché le capacità ottimali sono variabili da zona a zona: per ogni edificio viene considerato un serbatoio commerciale con capacità simile a quella ottimale.
Dopo aver ottenuto i costi e i risparmi, ne vengono calcolate le medie tra le differenti aree sub comunali, in modo da ottenere un valore rappresentativo di ogni voce di spesa per ogni edificio e poter così confrontare agevolmente i diversi edifici:

Tipo di edificio	1A	1B	1C	1D
costo energia annuo (€)	10,95	10,33	10,18	7,55
risparmio acqua annuo (€)	248,58	269,88	135,08	146,94
saldo annuo (€)	237,63	259,55	124,90	139,39
saldo annuo pro capite (€)	6,71	4,63	1,97	4,36
costo installazione (€)	49333,33	65000,00	57625,00	38000,00
Payback period (anni)	208	250	461	273

Tab. 48: *edifici della classe 1: valori medi dei costi e dei risparmi alla scala dell'edificio, del saldo annuo pro capite e del periodo di rientro economico dell'investimento*

Tipo di edificio	2	3	4	5	6
costo energia annuo (€)	5,21	4,65	4,19	4,01	4,03
risparmio acqua annuo (€)	98,31	93,86	95,21	66,70	36,31
saldo annuo (€)	93,10	89,21	91,02	62,69	32,27
saldo annuo pro capite (€)	3,74	7,23	14,21	15,04	16,14
costo installazione (€)	29150,00	18000,00	17000,00	14000,00	8000,00
Payback period (anni)	313	202	187	223	248

Tab. 49: *edifici dei tipi da 2 a 6: valori medi dei costi e dei risparmi alla scala dell'edificio, del saldo annuo pro capite e del periodo di rientro economico dell'investimento*

Le tab. 48 e tab. 49 mostrano chiaramente due aspetti: il primo è che il costo dell'energia è per qualsiasi edificio molto inferiore al risparmio di acqua, quindi il saldo annuo è sempre positivo; il secondo importante aspetto è che il costo d'installazione dell'impianto è molto alto rispetto al saldo annuo, quindi, volendo semplicemente conoscere il numero di anni di utilizzo dell'impianto che servirebbero per eguagliare il costo iniziale di installazione, si ottengono dei

valori estremamente grandi, superiori al secolo. Un periodo di rimborso maggiore di uno, due o tre secoli è sicuramente inaccettabile e privo di senso se paragonato alla vita umana e alla vita degli edifici stessi, da una parte poiché bisognerebbe mettere in conto probabili ristrutturazioni dell'impianto, modifiche delle tariffe dell'energia e dell'acqua e dall'altra parte potrebbero verificarsi modifiche dell'edificio stesso o la sua demolizione e molti altri aspetti che possono entrare in gioco in un periodo così lungo. Infine, un periodo di rimborso economico così lungo è probabilmente inaccettabile da parte dei proprietari proprio perché non vedranno il risultato economico del loro investimento iniziale.
In definitiva, in un ragionamento astratto si può affermare che se gli edifici della città fossero già dotati di un sistema di raccolta, si avrebbe sempre un risparmio economico: questo varrebbe indipendentemente dal fatto che il serbatoio sia interrato o installato al di sopra dell'utenza più elevata, poiché, come si è visto nelle tab. 48 e tab. 49, il costo dell'energia elettrica consumata dalla pompa sarebbe molto piccolo rispetto al risparmio generato dalla riduzione del prelievo di acqua. In particolare il costo dell'energia non è molto differente tra edifici considerevolmente differenti, ad esempio tra il tipo 1C e il tipo 6, mentre il risparmio d'acqua, direttamente proporzionale al volume d'acqua piovana utilizzato per fini non potabili, è maggiore negli edifici tozzi e quindi, nell'esempio, il tipo 6.

Conclusioni

Questa tesi ha riguardato il risparmio potenziale di acqua potabile nella città di Torino, generato dall'uso di acqua piovana per i fini domestici non potabili.
In primo luogo sono stati analizzati i principali fattori che regolano il funzionamento del sistema di raccolta dell'acqua piovana, a pari quantità di pioggia: l'area del tetto dell'edificio, la sua popolazione e la capienza del serbatoio. In particolare si è compreso come il rapporto tra i primi due parametri, definito *area pro capite* (apc), sia il fattore essenziale per stabilire il risparmio potenziale dell'edificio, in quanto è legato al rapporto tra l'offerta d'acqua e la domanda: più grande è l'area pro capite, più grande sarà la frazione di fabbisogno non potabile sostituibile da acqua piovana, frazione che viene chiamata NPWS. Gli edifici con grande apc vengono definiti tozzi, mentre gli edifici con piccola apc vengono definiti snelli. Per stabilire invece la capacità ottimale del serbatoio, dopo aver svolto la simulazione del funzionamento del serbatoio per tutti gli edifici rappresentativi della città, si è concluso che la sola area pro capite non è un parametro sufficiente, bisogna invece far riferimento a entrambe le caratteristiche dell'area del tetto e della popolazione separatamente: in particolare si osserva che la capacità ottimale cresce con l'area del tetto e diminuisce col numero di abitanti. Si può meglio comprendere questo comportamento analizzando una serie di edifici soggetti alla stessa serie temporale dell'altezza di pioggia, caratterizzati dall'avere uguale area del tetto (quindi stessa *offerta*) ma diversa popolazione e quindi diversa domanda d'acqua non potabile. In particolare, riferendosi per semplicità a un periodo di un anno, per gli edifici in cui l'offerta cumulata in un anno basta a soddisfare la domanda annua è facile dedurre che la capienza del serbatoio necessaria per garantire che ogni giorno la domanda venga soddisfatta, dev'essere tanto maggiore quanto maggiore è la domanda stessa; invece, negli edifici in cui la domanda annua supera l'offerta, non serve avere una capienza maggiore, poiché non esiste un ulteriore volume d'acqua da accumulare, ma anzi, essendo grande la domanda, dal serbatoio viene attinta più acqua e quindi il livello tende a scendere: in conclusione, la capienza del serbatoio può diminuire col crescere della domanda.
La simulazione principale del funzionamento del sistema di raccolta dell'acqua piovana (RWH), svolta nel capitolo 4, ha portato ai seguenti risultati: l'edificio di tipo 6 è l'unico edificio il cui fabbisogno non potabile è completamente sostituibile con acqua piovana, ossia è l'unico edificio ad avere un NPWS ottimale unitario; dal tipo 5 fino al tipo 2, NPWS ottimale decresce, in base alla decrescente area pro capite; l'edificio con il minor NPWS ottimale è il tipo 1C, nel quale solo il 10% circa della domanda non potabile può essere sostituito da acqua piovana.
L'unico edificio che ha FURE significativamente inferiore al $FURE_{limite}$ è il tipo 6: è questo l'unico caso in cui l'offerta di acqua piovana eccede la domanda ed è quindi l'unico caso in cui una parte dell'acqua piovana disponibile all'uso viene inviata alla fognatura.
La media degli indici NPWS di zona, pesata in base alla diffusione del generico edificio, riflette principalmente le caratteristiche degli edifici appartenenti all'area sub comunale in esame: nelle aree sub comunali in cui sono molto diffusi gli edifici tozzi (ossia con grande apc) l'NPWS di zona è maggiore rispetto a quello delle aree in cui prevalgono gli edifici snelli. La differente quantità di pioggia caduta nelle diverse zone della città (maggiore per le aree afferenti alla stazione Consolata rispetto a quelle afferenti alla stazione Vallere) influisce solo in piccolissima misura. I valori di NPWS di zona variano tra 18% (ASC L, afferente alla stazione Vallere), e 69% (ASC H, afferente alla stazione Consolata). L'area sub comunale L è infatti ricca di edifici snelli mentre l'area H appartiene in larga parte alla zona collinare, caratterizzata da

una grande diffusione di case mono o bifamiliari, ossia edifici tozzi. Anche la zona G, in prevalenza collinare, mostra un NPWS elevato.
La parte antica della città, compresa nei confini dell'ASC A, mostra un buon valore dell'indice, in quanto gli edifici più diffusi sono tozzi. All'opposto, le zone costruite prevalentemente nel Secondo dopoguerra e ricche di edifici molto alti e snelli (aree B, L) mostrano un NPWS basso. Le zone edificate in questo stesso periodo, ma che presentano un valore più alto dell'indice (M, E, F) sono quelle più eterogenee dal punto di vista edilizio, dove sono molto diffusi edifici di piccole dimensioni misti ad edifici alti e snelli.
Il risparmio idrico in termini di riduzione del volume d'acqua potabile consumato dalla generica area sub comunale dipende dalla sua popolazione: l'area che presenta il risparmio volumetrico maggiore è l'ASC C, poiché nonostante abbia un basso NPWS di zona, ha una grande popolazione. Le aree collinari mostrano un buon risultato anche in termini di risparmio globale.
Nel capitolo 5 è stata analizzata l'influenza di alcuni parametri sui risultati della simulazione. In base a questa analisi si può concludere che le differenze nell'entità della domanda non potabile pro capite portano a valori di NPWS di zona abbastanza diversi, perdendo tra i sei e i sette punti percentuali ogni dieci litri di incremento nella domanda: ciò significa che è molto importante conoscere il vero fabbisogno non potabile della popolazione per capire quale sia il risparmio potenziale. La variabilità della domanda pro capite all'interno della settimana non comporta differenze riguardo l'NPWS di zona rispetto alla simulazione a domanda costante, ricordando tuttavia che è stato mantenuto invariato il valor medio settimanale, usato in precedenza nella simulazione a domanda costante; infine, la differente distribuzione all'interno della giornata della pioggia raccolta rispetto al momento del prelievo (determinata dal parametro a), nel caso dell'area sub comunale Mirafiori Sud non influisce sui risultati della simulazione.
Nel capitolo 6 sono state svolte le simulazioni con periodo di riferimento di una anno, in modo da conoscere la variabilità annuale del risparmio idrico, strettamente legata all'offerta annua di pioggia. Si è osservato inoltre che se il volume iniziale di ogni simulazione è imposto essere uguale al volume finale della precedente simulazione, ossia non avviene alcuno svuotamento del serbatoio a fine anno, la media dei risultati annuali è molto simile al risultato della simulazione pluriennale.
Riguardo i costi e i benefici legati all'impianto di recupero e distribuzione dell'acqua piovana, si assume che ogni edificio residenziale venga dotato di un proprio serbatoio interrato con capienza pari alla capacità ottimale e una propria pompa che serve l'impianto di distribuzione. I risultati dell'analisi mostrano che il costo annuo dell'energia elettrica assorbita dalla pompa è, per ogni edificio, molto inferiore al risparmio in denaro dovuto al mancato prelievo di acqua potabile: se ne deduce quindi che non è necessario posizionare il serbatoio nel sottotetto dell'edificio per rendere conveniente il funzionamento dell'impianto. Inoltre, è possibile affermare che per un edificio già dotato dell'impianto non potabile il risparmio monetario è garantito: in particolare l'edificio di tipo 6 è il più avvantaggiato mentre l'edificio 1C è il meno redditizio. Tuttavia gli edifici della città di Torino sono sprovvisti del sistema di raccolta: mettendo in conto il costo iniziale di costruzione, si osserva che esso è enormemente superiore al saldo annuo, impedendo ai proprietari degli edifici di vedere rimborsato il loro investimento iniziale in un tempo ragionevole.
Un'analisi dei costi e dei benefici globali dovrebbe però prendere in considerazione anche ulteriori aspetti che hanno ripercussioni ad una scala più grande rispetto a quella del singolo edificio: in primo luogo la riduzione della portata di acqua piovana alle fognature e quindi la possibilità di installare collettori di sezione minore nelle aree dotate di sistemi di recupero dell'acqua piovana; in secondo luogo, anche l'acquedotto a servizio delle aree dotate con questi sistemi può essere dimensionato per portate inferiori.

Inoltre, nell'analisi svolta in questa tesi si è assunto che ogni edificio venga dotato di un proprio serbatoio, tuttavia, nella pratica, bisogna confrontarsi con gli spazi privati realmente a disposizione del singolo edificio per poter installare serbatoi che hanno una capacità variabile mediamente tra 15 e 30 m^3. A questo proposito, dato che l'obiettivo è quello di installare i sistemi di recupero dell'acqua piovana in tutti gli edifici della città, l'interesse collettivo potrebbe far sì che l'assunzione fatta in questa tesi venga superata: i serbatoi di compenso potrebbero essere infatti scelti di dimensione maggiore al fine di servire più di un edificio e venire dislocati dove c'è più spazio.
Infine, bisogna tenere presenti i limiti di questa tesi: se da un lato la popolazione del modello semplificato della città è uguale a quella reale, dall'altro lato è stato considerato solo un piccolo numero di tipi di edificio nel quale ridistribuirla. In particolare, il punto più critico è stato l'assegnazione dell'area del tetto ad ogni edificio rappresentativo: è stata semplicemente misurata, su carta catastale, l'area di base di alcuni edifici corrispondenti alle caratteristiche degli edifici rappresentativi in termini di numero di appartamenti e di piani fuori terra. Alcune ipotesi sono state formulate per ovviare a difetti nelle statistiche, come la scelta di edifici rappresentativi con due o tre appartamenti per piano, nel caso delle aree sub comunali di recente edificazione e di edifici di grande estensione orizzontale, nel caso delle zone di antica edificazione. Il volume d'acqua non potabile richiesto quotidianamente da ogni abitante è stato assunto essere costante nel tempo, in valore pari a un terzo del fabbisogno quotidiano pro capite di acqua per usi domestici: quest'ultimo valore è stato ipotizzato essere pari a 150 litri/giorno/abitante. Una semplificazione del modello di funzionamento del sistema RWH è stata quella di considerare concentrato il prelievo quotidiano di acqua dal serbatoio e non distribuito nella giornata come avverrebbe nella realtà. Riguardo l'offerta d'acqua, la serie temporale della pioggia è stata ricavata da due sole stazioni di misura ed è stata associata ad ogni area sub comunale e quindi ad ogni edificio ad essa appartenente solamente in base alla vicinanza tra la stazione e il centro geografico dell'area sub comunale di appartenenza. Infine, sia il coefficiente di deflusso che l'altezza di prima pioggia sono stati ipotizzati uguali per ogni edificio rappresentativo e costanti nel tempo, inoltre l'altezza di prima pioggia è stata sottratta a qualsiasi evento piovoso indipendentemente dagli eventi precedenti.

Bibliografia

[1] Wikipedia, «Vaso sanitario» [Online].

[2] A. Campisano, D. Butler, S. Ward, M. Burns, E. Friedler, K. DeBusk, L. N. Fisher-Jeffes, G. E., A. Rahman, F. Hiroaki e H. Mooyoung, «Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives» *Water research,* 2017.

[3] Da Deppo et al., Acquedotti, Cortina.

[4] A. Rizzo, in *Soluzioni basate sulla natura e riuso delle acque reflue; soluzioni tecniche innovativeper una gestione sostenibile delle acque*, Torino, 2019.

[5] C. Lucio, C. Matos Silva e V. Sousa, «A scaleadaptive method for urban rainwater harvesting simulation» *Science Direct,* 2019.

[6] R. Farreny, T. Morales-Pinzon, A. Guisasola, C. Tayà, J. Rieradevall e X. Gabarrell, «Roof selection for rainwater harvesting: quantity and quality assessments in Spain» *Water research,* 2011.

[7] M. Amin, T.-I. Kim, M. Amin e H. M.Y., «Effects of catchment, first-flush, storage conditions, and time on microbial quality in rainwater harvesting systems» *Water environment research,* 2013.

[8] B. Kus, J. Kandasamy, S. Vignesvaran e H. Shon, «Analysis of first flush to improve the water quality in rainwater tanks» *Water Science and technology,* 2010.

[9] Istat, «dati censimento popolazione Istat» [Online]. Available: http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx. [Consultato il giorno Giugno 2020].

[10] Wikipedia, «Torino» [Online].

[11] Città di Torino, «Geoportale e governo del territorio» [Online]. Available: http://geoportale.comune.torino.it/geocatalogocoto/?sezione=mappa.

[12] Istat, «Distribuzione di acqua potabile anno 2015» [Online].

[13] ArpaPiemonte, «Banca dati meteorologica» [Online]. Available: https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-meteorologica.html. [Consultato aprile 2020].

[14] ATO3torinese, «Articolazione tariffaria per il servizio idrico integrato anno 2020» [Online]. Available: http://www.ato3torinese.it/site2015/utenti/tariffe/tariffe-sii-2020-escluso-titolo-IV-sito.pdf. [Consultato novembre 2020].

[15] Rewatec, «Soluzioni ecologiche per lo sfruttamento dell'acqua piovana, Catalogo completo 2020» [Online]. Available: https://www.platzgummer.it/cms/upload/prodotti/040_20Recupero_20acqua_20piovana/005_20Rewatec_20catalogo_20completo_20recupero_20aque_20piovane.pdf.

[Consultato novembre 2020].

[16] E. Marchi e A. Rubatta, Meccanica dei fluidi, Torino: UTET, 2004.

[17] M. e. M. Doninelli, Tabelle e diagrammi perdite di carico acqua, Caleffi.

[18] Lowara, «Elettropompe centrifughe multistadio orizzontali filettate con motori IE3, Serie e-HM» [Online]. Available: http://www.xylemitalia.it/Catalogo/pompeEHM.html. [Consultato novembre 2020].