POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

RainWater Harvesting a scala di edificio: confronto tra diversi approcci per la determinazione del volume ottimale di stoccaggio

Relatori

Prof. Roberto Revelli

Prof.ssa Ilaria Butera

Candidato

Flavio Salvatico

Anno Accademico 2019/2020

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto i miei relatori, Professor Roberto Revelli e Professoressa Ilaria Butera, per le risorse e il tempo che hanno messo a mia disposizione, nonché per i consigli che mi hanno dato per la stesura del lavoro di tesi.

Un ringraziamento va inoltre alla mia famiglia, per il sostegno continuo in questi anni di università.

Abstract

La risorsa idrica si sta progressivamente trasformando in un bene sempre più raro, rendendo la crisi mondiale dell'acqua un problema ogni giorno più attuale e globalmente diffuso. L'incremento esponenziale della popolazione mondiale, il miglioramento della qualità della vita, la distribuzione eterogenea della risorsa idrica e i cambiamenti climatici sono i fattori che contribuiscono maggiormente a ridurre la disponibilità d'acqua dolce del pianeta. Una recente indagine dell'ONU ha stimato che nel 2030 il 47% della popolazione mondiale vivrà in zone contrassegnate da uno stress idrico elevato. Occorre pertanto individuare soluzioni efficaci per contrastare il suddetto problema: l'obiettivo del presente elaborato sarà quello di analizzare il bilancio idrico a scala di edificio, in modo da attuare modalità innovative per ridurre, almeno in parte, i consumi idrici domestici; infatti, nonostante l'acqua utilizzata in ambito civile costituisca una frazione contenuta del consumo idrico totale, variabile tra l'8% e il 20% a seconda delle aree geografiche, tale percentuale è però in continua crescita.

Saranno innanzitutto descritti i principali modelli di bilancio idrico, relativi sia ad un edificio che agli eventuali sottosistemi spaziali: questi modelli considerano modalità alternative di approvvigionamento idrico, consistenti nella raccolta delle acque meteoriche e nel riciclaggio delle acque reflue, e si prefiggono gli obiettivi di valutare il rendimento del sistema, in termini di minimizzazione della domanda domestica dall'acquedotto e di riduzione dei deflussi nella rete fognaria, nonché la sua fattibilità economica. Verrà poi considerata anche la specifica tecnica italiana UNI/TS 11445:2012 per quanto riguarda la progettazione di un impianto per la raccolta dell'acqua piovana, soluzione che costituisce la principale modalità di approvvigionamento idrico alternativo.

Gli ultimi tre capitoli dell'elaborato saranno infine incentrati sull'applicazione della norma UNI/TS 11445 e dei due modelli di bilancio idrico relativi ad un serbatoio di stoccaggio delle acque meteoriche per gli utilizzi non potabili, confrontando infine i risultati ottenuti: gli obiettivi sono molteplici, in quanto si eseguirà dapprima il dimensionamento di due sistemi RainWater Harvesting, per poi valutare la loro fattibilità economica e il loro rendimento. I due edifici residenziali di riferimento, ossia una villa bifamiliare e un condominio con 18 unità abitative, si differenziano per numero e tipologia di utenti, area della copertura e capacità della cisterna di raccolta e consentono pertanto di determinare il possibile beneficio economico derivante dall'installazione di sistemi RWH per edifici completamente diversi tra loro. I metodi alternativi di approvvigionamento idrico, ad eccezione di alcune aree del pianeta, sono poco impiegati: tuttavia, come sarà dimostrato nell'elaborato, l'innovazione tecnologica sta rendendo questi sistemi sempre più convenienti, garantendo quindi, oltre che i già noti vantaggi ambientali, benefici economici sempre maggiori.

Indice

Indice delle figure ..... pag. IV

Indice delle tabelle ..... pag. VII

Introduzione ..... pag. 1

1. L'importanza della risorsa idrica ..... pag. 4

1.1 Ripartizione delle acque sul pianeta ..... pag. 4
1.2 Fattori che riducono la disponibilità idrica ..... pag. 8
1.3 Disponibilità idrica su scala globale ..... pag. 12
1.4 Disponibilità idrica su scala europea ..... pag. 14
1.5 Disponibilità idrica su scala nazionale ..... pag. 15
1.6 Crisi mondiale dell'acqua ..... pag. 18
1.7 Concetti di impronta idrica e di acqua virtuale ..... pag. 20
1.8 Sfruttamento della risorsa idrica ..... pag. 25

2. Studio analitico del bilancio idrico a scala di edificio ..... pag. 30

2.1 Modello di bilancio idrico proposto da Agudelo-Vera et al. (2013) ..... pag. 31
2.1.1 Equazioni del modello matematico ..... pag. 33
2.1.2 Obiettivi dell'approccio UHA ..... pag. 42
2.1.3 Indici di profilo metabolico ..... pag. 45
2.1.4 Applicazione del modello di Agudelo-Vera et al. (2013) a due casi reali ..... pag. 48
2.1.5 Conclusioni ..... pag. 56
2.1.6 Tabella riassuntiva del modello di Agudelo-Vera et al. (2013) ..... pag. 57

3. Modello di bilancio idrico proposto da Pelak e Porporato (2016) ..... pag. 59

3.1 Analisi con parametri adimensionali ..... pag. 62
3.2 Determinazione della capacità ottimale del serbatoio ..... pag. 69
3.3 Esempi applicativi ..... pag. 75
3.4 Tabelle riassuntive del modello di Pelak e Porporato (2016) ..... pag. 79

4. Modello di bilancio idrico proposto da Thirintzis et al. (2013-2017) ..... pag. 81

4.1 Metodologia impiegata ..... pag. 82
4.2 Analisi costi-benefici ..... pag. 86
4.3 Risultati e considerazioni finali ..... pag. 87
4.4 Tabelle riassuntive del modello di Tsihrintzis et al. (2013-2017) ..... pag. 94

5. Normativa UNI/TS 11445:
Impianti per la raccolta e l'utilizzo dell'acqua piovana ..... pag. 96

5.1 Aspetti generali ..... pag. 96
5.2 Progettazione di un impianto di stoccaggio delle acque piovane ..... pag. 97
5.2.1 Metodo semplificato ..... pag. 97
5.2.2 Metodo analitico ..... pag. 101
5.3 Componenti di un impianto di stoccaggio delle acque piovane ..... pag. 103
5.3.1 Superfici di captazione ..... pag. 103
5.3.2 Tubazioni di raccolta delle acque meteoriche ..... pag. 104
5.3.3 Filtrazione meccanica e sedimentazione ..... pag. 105
5.3.4 Sistema di accumulo ..... pag. 106
5.3.5 Pompe ..... pag. 107
5.3.6 Unità di controllo ..... pag. 108
5.3.7 Sistema di distribuzione ..... pag. 109
5.3.8 Sistema di alimentazione supplementare ..... pag. 110

6. Applicazione della specifica tecnica UNI/TS 11445 ..... pag. 111

6.1 Primo caso studio: Edificio condominiale ..... pag. 111

6.1.1 Caratteristiche dell'edificio oggetto di studio ..... pag. 111

6.1.2 Rilevamento dei consumi ..... pag. 113

6.1.3 Elaborazione dei dati ..... pag. 115

6.1.4 Valutazione economica di un impianto idrico tradizionale ..... pag. 118

6.1.5 Progettazione di un serbatoio per la raccolta delle acque piovane ..... pag. 124

6.1.6 Simulazione numerica del bilancio idrico ..... pag. 127

6.1.7 Valutazione economica di un sistema a doppio impianto ..... pag. 131

6.2 Secondo caso studio: Villa bifamiliare ..... pag. 139

6.2.1 Caratteristiche dell'edificio oggetto di studio ..... pag. 139

6.2.2 Rilevamento dei consumi ..... pag. 140

6.2.3 Elaborazione dei dati ..... pag. 142

6.2.4 Valutazione economica di un impianto idrico tradizionale ..... pag. 144

6.2.5 Progettazione di un serbatoio per la raccolta delle acque piovane ..... pag. 149

6.2.6 Simulazione numerica del bilancio idrico ..... pag. 151

6.2.7 Valutazione economica di un sistema a doppio impianto ..... pag. 154

7. Applicazione del modello di Pelak e Porporato (2016). ..... pag. 163

7.1 Applicazione del modello a due edifici residenziali di Mondovì ..... pag. 163

7.2 Applicazione del modello a edifici analoghi dislocati sul territorio nazionale ..... pag. 168

8. Applicazione del modello di Tsihrintzis et al. (2013-2017) ..... pag. 178

8.1 Applicazione del modello al sistema RWH del condominio di Mondovì ..... pag. 181

8.2 Applicazione del modello al sistema RWH della villa bifamialiare di Mondovì .... pag. 184

8.3 Confronto dei risultati ottenuti dall'applicazione delle tre metodologie ..... pag. 187

Conclusioni e sviluppi futuri ..... pag. 189

Bibliografia ..... pag. 192

Sitografia ..... pag. 195

Indice delle figure

Figura 1.1: Andamento temporale della popolazione mondiale dal 1950 al 2100 ..... pag. 8
Figura 1.2: Evoluzione temporale della temperatura globale dal 1850 al 2019 ..... pag. 12
Figura 1.3: Disponibilità idrica pro capite a livello globale nel 2007..... pag. 19
Figura 1.4: Impronta idrica blu nel periodo 1996-2005..... pag. 22
Figura 1.5: Impronta idrica verde nel periodo 1996-2005 ..... pag. 22
Figura 1.6: Impronta idrica grigia nel periodo 1996-2005..... pag. 23
Figura 1.7: Impronta idrica totale nel periodo 1996-2005 ..... pag. 23
Figura 1.8: Valori del parametro WEI calcolati per 31 Stati europei ..... pag. 28

Figura 2.1: Schema del sistema idrico impiegato per realizzare l'approccio UHA..... pag. 32
Figura 2.2: Schema del bilancio idrico a scala di edificio ..... pag. 35
Figura 2.3: Schema del bilancio idrico a scala di sottosistema..... pag. 39
Figura 2.4: Schema del bilancio idrico del 1° serbatoio di raccolta delle acque grigie..... pag. 41
Figura 2.5: Schema del bilancio idrico del 2° serbatoio per il riciclaggio delle acque grigie .. pag. 41
Figura 2.6: Schema del bilancio idrico del 3° serbatoio per soddisfare la domanda idrica..... pag. 41
Figura 2.7: Simulazione dei consumi idrici nell'arco delle 24 ore ..... pag. 51
Figura 2.8: Risorse idriche raccolte per la villa monofamiliare in base alle tre strategie..... pag. 54
Figura 2.9: Risorse idriche raccolte per il condominio in base alle tre strategie ..... pag. 54

Figura 3.1: Schema del bilancio idrico del serbatoio per la raccolta delle acque meteoriche ... pag. 60
Figura 3.2: Funzione a gradino Heaviside per la valutazione dello sfioro dal serbatoio..... pag. 62
Figura 3.3: Funzione di Densità di Probabilità al variare del volume normalizzato nel serbatoio, con area della copertura pari a 267 m^2..... pag. 64
Figura 3.4: Funzione di Densità di Probabilità al variare del volume normalizzato nel serbatoio, con area della copertura pari a 133,5 m^2..... pag. 64
Figura 3.5: Andamento dell'efficienza del sistema RWH in funzione dell'indice di domanda del serbatoio (D_c), per diversi valori della variabile γ ..... pag. 66
Figura 3.6: Costo dei serbatoi commerciali al variare del loro volume..... pag. 69

Figura 3.7: Costo unitario dell'acqua di rete in funzione dei consumi mensili ..... pag. 70
Figura 3.8: Costo fisso, distribuito e totale in funzione del volume del serbatoio..... pag. 72
Figura 3.9: Rendimenti dei sistemi RWH della residenza universitaria reale e fittizia..... pag. 76
Figura 3.10: Rendimenti dei due sistemi RWH installati per la villa e il condominio ..... pag. 78

Figura 4.1: Posizione geografica dell'area di studio..... pag. 80
Figura 4.2: Serie storica delle piogge rilevate dalla stazione meteorologica di Milos ..... pag. 82
Figura 4.3: Schema del bilancio idrico del serbatoio per la raccolta delle acque piovane ..... pag. 84
Figura 4.4: Affidabilità in funzione dell'area di copertura e del volume del serbatoio..... pag. 88
Figura 4.5: Capacità ottimale del serbatoio per soddisfare il 35% della domanda idrica giornaliera per 5 diverse efficienze, 4 utenti e un consumo di 150 l / d·p..... pag. 90
Figura 4.6: Capacità ottimale del serbatoio per soddisfare il 35% della domanda idrica giornaliera per 5 diverse efficienze, 4 utenti e un consumo di 120 l / d·p..... pag. 91

Figura 5.1: Volume utile del sistema di accumulo a servizio di 4 abitanti in funzione della superficie di copertura..... pag. 100
Figura 5.2: Volume utile del sistema di accumulo a servizio di 8 abitanti in funzione della superficie di copertura..... pag. 100

Figura 6.1: Vista esterna dell'edificio..... pag. 112
Figura 6.2: Planimetria delle due tipologie di appartamenti del condominio..... pag. 112
Figura 6.3: Contatore idrico installato in prossimità della strada privata dell'edificio..... pag. 113
Figura 6.4: Consumi pro capite progressivi nei giorni lavorativi e retta interpolante ..... pag. 116
Figura 6.5: Consumi pro capite progressivi nei giorni festivi e retta interpolante..... pag. 116
Figura 6.6: Consumi giornalieri pro capite per l'intervallo temporale considerato..... pag. 117
Figura 6.7: Costi totali annui per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica..... pag. 122
Figura 6.8: Costi totali annui previsti per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica..... pag. 123
Figura 6.9: Ripartizione dei consumi idrici per usi domestici ..... pag. 126
Figura 6.10: Caratteristiche, prezzo e forma della cisterna oggetto di studio..... pag. 131
Figura 6.11: Costi totali annui per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica..... pag. 135
Figura 6.12: Costi totali annui previsti per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica con o senza l'installazione del sistema RWH..... pag. 137

Figura 6.13: Costi cumulati previsti in caso di assenza o installazione del sistema RWH..... pag. 138
Figura 6.14: Vista esterna dell'edificio..... pag. 139
Figura 6.15: Planimetria di un generico piano della villa bifamiliare ..... pag. 140
Figura 6.16: Contatore dell'acqua installato in prossimità dell'ingresso dell'edificio ..... pag. 141
Figura 6.17: Consumi pro capite progressivi nei giorni lavorativi e retta interpolante ..... pag. 143
Figura 6.18: Consumi pro capite progressivi nei giorni festivi e retta interpolante..... pag. 143
Figura 6.19: Consumi giornalieri pro capite per l'intervallo temporale considerato..... pag. 144
Figura 6.20: Costi totali annui per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica..... pag. 147
Figura 6.21: Costi totali annui previsti per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica..... pag. 149
Figura 6.22: Caratteristiche, prezzo e forma della cisterna oggetto di studio..... pag. 155
Figura 6.23: Costi totali annui per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica..... pag. 159
Figura 6.24: Costi totali annui previsti per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica con o senza l'installazione del sistema RWH..... pag. 161
Figura 6.25: Costi cumulati previsti in caso di assenza o installazione del sistema RWH..... pag. 162

Figura 7.1: Rendimenti dei sistemi RWH installati per villa e condominio di Mondovì ..... pag. 166
Figura 7.2: Rendimenti dei sistemi RWH installati nelle ville di 5 città italiane ..... pag. 175
Figura 7.3: Rendimenti dei sistemi RWH installati nei condomini di 5 città italiane ..... pag. 176

Figura 8.1: Andamento del coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH installato per il condominio al variare dell'area del tetto e del volume della cisterna ..... pag. 182
Figura 8.2: Andamento del coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH installato per la villa bifamialiare al variare dell'area del tetto e del volume della cisterna ..... pag. 185

Indice delle tabelle

Tabella 1.1: Ripartizione dei volumi idrici su scala globale ..... pag. 7
Tabella 1.2: Risultati del risparmio idrico conseguente al processo di decoupling ..... pag. 10
Tabella 1.3: Evoluzione della risorsa idrica pro capite disponibile nel mondo ..... pag. 13
Tabella 1.4: Evoluzione della risorsa idrica pro capite disponibile in Europa ..... pag. 14
Tabella 1.5: Stima delle risorse disponibili in Italia per compartimento idrografico ..... pag. 16
Tabella 1.6: Indicatori WEI relativi ai Paesi extraeuropei ..... pag. 26
Tabella 1.7: Indicatori WEI relativi ai Paesi europei ..... pag. 27

Tabella 2.1: Descrizione dei parametri delle unità abitative prese in esame ..... pag. 32
Tabella 2.2: Consumi idrici giornalieri convenzionali e minimizzati per i due edifici ..... pag. 49
Tabella 2.3: Categorie della domanda idrica giornaliera pro capite ..... pag. 50
Tabella 2.4: Valori annuali simulati con il software SIMDEUM per i 4 casi di studio ..... pag. 52
Tabella 2.5: Specifiche del sottosistema ..... pag. 53
Tabella 2.6: Input del modello di Agudelo-Vera et al. (2013) ..... pag. 57

Tabella 3.1: Parametri impiegati per determinare l'efficienza del sistema RWH ..... pag. 68
Tabella 3.2: Grandezze impiegate per il calcolo del rendimento dei 2 sistemi RWH ..... pag. 75
Tabella 3.3: Parametri adimensionali per il calcolo del rendimento dei 2 sistemi RWH ..... pag. 75
Tabella 3.4: Parametri adimensionali per il calcolo dell'efficienza dei sistemi ..... pag. 77
Tabella 3.5: Input del modello di Pelak e Porporato (2016) ..... pag. 79
Tabella 3.6: Parametri adimensionali per calcolare il rendimento di un sistema RWH ..... pag. 79
Tabella 3.7: Input per la valutazione dell'aspetto economico ..... pag. 80

Tabella 4.1: Componenti di un sistema di raccolta dell'acqua piovana e relativi costi ..... pag. 87
Tabella 4.2: Parametri necessari per ottenere una determinata efficienza (Scenario IIa) ..... pag. 89
Tabella 4.3: Parametri necessari per ottenere una determinata efficienza (Scenario IIb) ..... pag. 91
Tabella 4.4: Input del modello di Tsihrintzis et al. (2013-2017) ..... pag. 94
Tabella 4.5: Parametri impiegati per calcolare l'affidabilità di un sistema RWH ..... pag. 94
Tabella 4.6: Input per lo svolgimento dell'analisi costi-benefici ..... pag. 95

Tabella 5.1: Valori del coefficiente di afflusso φ ..... pag. 98

Tabella 5.2: Determinazione del fabbisogno idrico per usi domestici diversi dall'uso umano . pag. 99

Tabella 6.1: Caratteristiche dell'edificio preso in esame ..... pag. 111

Tabella 6.2: Dati relativi al monitoraggio dei consumi ..... pag. 114

Tabella 6.3: Consumi idrici giornalieri del condominio ..... pag. 115

Tabella 6.4: Struttura tariffaria applicata per l'anno 2019 a Mondovì ..... pag. 118

Tabella 6.5: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% per il decennio 2010-2019 ..... pag. 121

Tabella 6.6: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% previsti per il trentennio 2019-2048 ..... pag. 123

Tabella 6.7: Valori del coefficiente di afflusso φ ..... pag. 125

Tabella 6.8: Piogge medie mensili ed annue e numero di giorni piovosi (1951-1990) ..... pag. 125

Tabella 6.9: Bilancio idrico mensile e annuo del sistema RWH in studio ..... pag. 128

Tabella 6.10: Scala delle Classi di Efficienza Idrica ..... pag. 130

Tabella 6.11: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% per il decennio 2010-2019 ..... pag. 135

Tabella 6.12: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% previsti per il trentennio 2019-2048 ..... pag. 136

Tabella 6.13: Caratteristiche dell'edificio preso in esame ..... pag. 139

Tabella 6.14: Dati relativi al monitoraggio dei consumi ..... pag. 141

Tabella 6.15: Consumi idrici giornalieri della villa bifamiliare ..... pag. 142

Tabella 6.16: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% per il decennio 2010-2019 ..... pag. 147

Tabella 6.17: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% previsti per il trentennio 2019-2048 ..... pag. 148

Tabella 6.18: Bilancio idrico mensile e annuo del sistema RWH in studio ..... pag. 152

Tabella 6.19: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% per il decennio 2010-2019 ..... pag. 159

Tabella 6.20: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% previsti per il trentennio 2019-2048 ..... pag. 160

Tabella 7.1: Parametri di base per il calcolo del rendimento dei sistemi RWH ..... pag. 164

Tabella 7.2: Fabbisogni idrici per usi domestici diversi dal consumo umano ..... pag. 165

Tabella 7.3: Parametri climatici per il calcolo del rendimento dei sistemi RWH ..... pag. 165

Tabella 7.4: Parametri adimensionali per il calcolo dell'efficienza dei sistemi RWH ..... pag. 166

Tabella 7.5: Rendimenti dei sistemi RWH oggetto di studio ..... pag. 166

Tabella 7.6: Coefficienti di afflusso per diverse tipologie di copertura ..... pag. 170

Tabella 7.7: Deflusso meteorico annuo calcolato con la norma UNI/TS 11445:2012 ..... pag. 170

Tabella 7.8: Calcolo del fabbisogno idrico annuo per usi diversi dal consumo umano ..... pag. 171

Tabella 7.9: Calcolo del coefficiente adimensionale F_P per le cinque città italiane ..... pag. 171

Tabella 7.10: Calcolo del volume ottimale delle cisterne di accumulo ..... pag. 172
Tabella 7.11: Determinazione del serbatoio commerciale per i diversi casi di studio..... pag. 173
Tabella 7.12: Parametri di base per il calcolo del rendimento dei sistemi RWH ..... pag. 173
Tabella 7.13: Parametri climatici per il calcolo del rendimento dei sistemi RWH ..... pag. 174
Tabella 7.14: Parametri adimensionali per il calcolo dell'efficienza dei sistemi RWH..... pag. 174
Tabella 7.15: Rendimenti dei diversi sistemi RWH oggetto di studio..... pag. 175
Tabella 7.16: Regimi pluviometrici delle 2 città e rendimenti dei 4 sistemi RWH..... pag. 177

Tabella 8.1: Parametri necessari per definire il coefficiente di affidabilità R_c del sistema RWH installato per il condominio ..... pag. 181
Tabella 8.2: Valori del coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH del condominio in funzione dell'estensione (A) della copertura e del volume (V) del serbatoio .... pag. 182
Tabella 8.3: Parametri necessari per definire il coefficiente di affidabilità R_c del sistema RWH installato per la villa bifamiliare ..... pag. 184
Tabella 8.4: Valori del coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH della villa in funzione dell'estensione (A) della copertura e del volume (V) del serbatoio .... pag. 185

Introduzione

Tra i temi più diffusi a scala globale, in questi ultimi anni sta assumendo progressivamente maggiore importanza quello relativo alla pianificazione e alla gestione delle risorse idriche: questa espressione indica, in senso generale, tutte le varie forme di disponibilità dell'acqua, sostanza indispensabile per la sopravvivenza dell'uomo e dell'ecosistema in cui vive.
Per soddisfare adeguatamente i fabbisogni idrici civili, industriali, agricoli ed energetici futuri occorrerà introdurre, in maniera sempre più diffusa e scrupolosa, tecnologie e modelli di risparmio: l'obiettivo del presente elaborato è quello di focalizzarsi sui consumi idrici in ambito domestico e in particolare sul cosiddetto "bilancio idrico a scala di edificio", analizzando dapprima in quali proporzioni i diversi contributi in ingresso e in uscita possono influire sull'equilibrio complessivo e determinando successivamente metodologie economicamente ed operativamente sostenibili, ossia tali da garantire il risparmio idrico.

L'obiettivo del primo capitolo è quello di fornire una visione ampia sulla rilevanza che la risorsa idrica sta gradualmente acquisendo, avviando la discussione con la descrizione e la quantificazione delle varie tipologie di risorse idriche terrestri e ponendo un'attenzione particolare a quelle categorie che risultano essere di fondamentale importanza per il fabbisogno idrico umano. Verranno poi elencati i principali fattori che contribuiscono a ridurre la disponibilità idrica annua pro capite, quali l'incremento della popolazione mondiale, il progressivo miglioramento della qualità della vita, l'eterogeneità nella distribuzione dell'acqua sul pianeta e i cambiamenti climatici.
I paragrafi successivi saranno invece dedicati alla definizione dell'andamento temporale della disponibilità idrica pro capite, a partire dal livello complessivo, quello a scala globale, scendendo progressivamente nel dettaglio, fino a raggiungere la scala nazionale e quindi quella regionale. Un'attenzione di riguardo sarà rivolta alla situazione idrica in Italia, per la quale verrà effettuata una stima dei volumi della risorsa idrica disponibile, suddivisi per compartimento idrografico e ripartiti tra risorse superficiali e sotterranee, nonché un'analisi delle soluzioni economiche atte ad arginare il problema.
Si introdurrà successivamente il concetto di crisi mondiale dell'acqua, emergenza che sta assumendo proporzioni sempre più ampie e preoccupanti, e le stime elaborate dalle principali organizzazioni mondiali che operano in tale campo; contestualmente verrà dato ampio spazio alla definizione e alla successiva analisi della distribuzione spaziale dell'impronta idrica su scala globale, in modo da determinare in quali proporzioni ogni Stato contribuisce allo sfruttamento delle riserve d'acqua dolce del pianeta per la produzione dei beni di consumo.

Saranno poi prese in esame le previsioni future a cui l'umanità rischia di incorrere entro la metà di questo secolo e le principali misure amministrative ed economiche che saranno introdotte per arginare la condizione attuale. Nella parte conclusiva del primo capitolo verrà infine introdotto l'indicatore adimensionale "Water Exploitation Index": esso esprime la pressione a cui sono soggette le riserve d'acqua dolce del pianeta, dovuta al crescente impatto che i prelievi idrici hanno sulla limitata e disomogenea disponibilità idrica a livello mondiale.

I capitoli 2, 3 e 4 eseguiranno un dettagliato approccio analitico relativamente ai principali modelli di bilancio idrico a scala di edificio: la conoscenza dettagliata, sia facendo riferimento alla scala spaziale che a quella temporale, dei volumi idrici in ingresso e in uscita dall'edificio è di fondamentale importanza poiché consente di attuare soluzioni innovative dal punto di vista economico, tramite la minimizzazione dei costi totali, e dal lato ecologico-ambientale, grazie alla riduzione dei volumi idrici prelevati dalla rete acquedottistica pubblica.
Il primo modello di bilancio idrico che verrà trattato è quello che è stato presentato nel 2013 attraverso lo studio di Agudelo-Vera, Keesman, Mels e Rijnaarts: esso introduce notevoli innovazioni dal punto di vista tecnologico, poiché implementa soluzioni di risparmio idrico non solo attraverso lo stoccaggio e il successivo utilizzo delle acque piovane ma anche grazie al riciclaggio delle acque grigie, determinando quindi il massimo risparmio idrico attualmente conseguibile per un'abitazione. L'equazione del bilancio idrico, proposta dal suddetto modello, trae spunto dall'approccio UHA per la gestione delle risorse idriche a scala urbana e considera la scala temporale oraria e diverse scale spaziali, a partire dall'edificio fino a scendere progressivamente ad ogni singolo serbatoio che compone il sistema; l'obiettivo sarà quello di definire numericamente, attraverso tre parametri adimensionali, l'efficienza del sistema in assenza o in presenza delle soluzioni di risparmio idrico sopra descritte.
Successivamente saranno presi in considerazione i risultati dello studio effettuato nel 2016 da Pelak e Porporato: il modello di bilancio idrico da essi elaborato considera la scala temporale giornaliera ed è volto alla determinazione sia dell'efficienza del sistema che alla valutazione del volume ottimale, caratterizzato cioè dai costi totali minimi, di un serbatoio di stoccaggio delle acque meteoriche per il successivo utilizzo domestico non potabile. Seguiranno alcune applicazioni numeriche per la determinazione del rendimento della cisterna, facendo riferimento a diverse casistiche, reali o fittizie, nella città di Durham (NC, USA), dove il modello è stato implementato per la prima volta.
Verrà infine analizzato un terzo modello, proposto per la prima volta nel biennio 2013-2014 dai Greci Tsihrintzis e Baltas: anch'esso considera la scala temporale giornaliera, focalizzandosi sia sulla determinazione dell'efficienza di un serbatoio per lo stoccaggio delle acque meteoriche che sulla successiva valutazione di fattibilità economica dello stesso. Il modello è stato introdotto per elaborare soluzioni in grado di fronteggiare una situazione di profondo stress idrico, in quanto la posizione geografica dell'area di studio è tale da determinare sia regimi pluviometrici limitati che la contemporanea assenza di acquiferi estesi; al tempo stesso verranno sottolineate le variazioni apportate dal suddetto modello nel calcolo degli afflussi meteorici e della domanda idrica dell'utenza.

Il quinto capitolo avrà l'obiettivo di descrivere i principali aspetti relativi alla norma italiana UNI/TS 11445, che dalla sua entrata in vigore il 24 maggio 2012 fornisce le indicazioni relativamente alla progettazione, all'installazione e alla manutenzione degli impianti per la raccolta e l'utilizzo dell'acqua piovana per usi diversi dal consumo umano. La raccolta delle acque meteoriche costituisce il sistema di approvvigionamento idrico alternativo che presenta i maggiori vantaggi, non solo dal punto di vista economico ma anche per quanto riguarda la tutela ambientale, grazie ad una notevole riduzione dei prelievi dalla rete acquedottistica.

L'intento del sesto capitolo sarà quello di applicare le indicazioni fornite dalla specifica tecnica UNI/TS 11445:2012, effettuando il dimensionamento e la successiva valutazione di fattibilità economica di due sistemi RainWater Harvesting per la raccolta delle acque meteoriche in grado di soddisfare gli utilizzi idrici per il WC; gli edifici residenziali che saranno presi in considerazione sono costituiti rispettivamente da un condominio a tre piani fuori terra e da una villa bifamiliare su due piani, situati entrambi nel comune di Mondovì in provincia di Cuneo.

Dopo aver descritto le principali caratteristiche degli immobili, saranno presentati i risultati del monitoraggio dei consumi: quest'ultimo è stato eseguito quotidianamente, distinguendo la domanda idrica tra i giorni lavorativi e quelli festivi, aumentando conseguentemente l'affidabilità dei risultati ottenuti. Seguiranno le valutazioni economiche di un impianto idrico tradizionale e di un approccio integrato, che prevede anche l'installazione di una cisterna di stoccaggio delle acque piovane: entrambe le soluzioni, valutate per un intervallo temporale pari a trent'anni, saranno eseguite sotto le ipotesi di consumi idrici costanti e di un progressivo aumento delle tariffe per il Servizio Idrico Integrato.
La scelta di considerare due diversi edifici residenziali è motivata dalla necessità di valutare la flessibilità dell'analisi economica su una gamma di edifici più estesa: si osserverà infatti che i dati di input, quali l'area della copertura, i consumi idrici giornalieri e il volume del serbatoio di stoccaggio, cambiano notevolmente in funzione della tipologia di edificio esaminato e possono quindi incentivare o sconsigliare l'installazione di un sistema di approvvigionamento idrico alternativo.

Nel settimo e nell'ottavo capitolo verranno infine confrontati, sia in termini di minimizzazione della domanda idrica richiesta alla rete acquedottistica municipale che di riduzione degli sfiori, i risultati ottenuti nel capitolo 6 con l'applicazione della specifica tecnica UNI/TS 11445 e quelli derivanti invece dall'utilizzo dei due modelli di bilancio idrico proposti rispettivamente da Pelak e Porporato (2016) e da Tsihrintzis et al. (2013-2017): l'obiettivo è quello di individuare le analogie e le eventuali differenze sussistenti tra le tre metodologie, individuando quella che fornisce i risultati più affidabili.

La conclusione sarà poi incentrata sui risultati ottenuti nel corso dell'intero elaborato, con particolare riferimento al dimensionamento e alla successiva valutazione di fattibilità tecnico-economica di un sistema di approvvigionamento idrico alternativo; verrà infine dato ampio spazio alle applicazioni future attuabili nell'ottica di un ulteriore miglioramento dell'efficienza idrica degli edifici.

1. L’importanza della risorsa idrica

L'acqua ha da sempre rappresentato una risorsa fondamentale per garantire la nascita e il successivo sviluppo degli insediamenti urbani, che sorgono infatti in larga parte in prossimità dei fiumi e delle sorgenti d'acqua; essa viene inoltre utilizzata a scopi nutrizionali, nonché in agricoltura e nell'industria in quantitativi sempre maggiori, poiché l'evoluzione scientifica e tecnologica hanno determinato, a partire dal XIX secolo, uno sviluppo industriale e demografico senza precedenti, con un conseguente fabbisogno idrico via via crescente. Tale risorsa non è però esente da problemi gestionali poiché, seppur rinnovabile, è contenuta in quantità solo apparentemente illimitate, è caratterizzata da una distribuzione spaziale non uniforme e richiede inoltre la costruzione di adeguate opere idrauliche per poterla rendere disponibile sul territorio per i suoi molteplici utilizzi. Ulteriori fattori di natura antropica, quali i cambiamenti climatici, l’inquinamento, il ritardo nello sviluppo di tecnologie idonee per l’approvvigionamento idrico e l’uso non responsabile della risorsa idrica, contribuiscono ad accelerare in maniera esponenziale questi problemi.

La scarsità idrica è un problema in continuo aumento, così come la salinizzazione e l’inquinamento delle falde acquifere; tutti questi fattori costituiscono una minaccia crescente per la produzione alimentare globale: a titolo di esempio, è possibile osservare come nelle principali aree di produzione cerealicola, il crescente prelievo idrico di acqua di falda stia impoverendo notevolmente le riserve idriche sotterranee, determinandone il progressivo esaurimento, con effetti riscontrabili sia sulle comunità rurali, che da esse dipendono strettamente, sia sugli ecosistemi naturali. La condizione globale attuale, caratterizzata da abbondanza di sorgenti, corsi d’acqua, falde acquifere e infrastrutture di captazione, trasporto e distribuzione della risorsa idrica, rende estremamente difficile la percezione di un bene in pericolo, il cui venir meno potrebbe non essere preceduto da segnali tali da evitare improvvise situazioni di emergenza.

1.1 Ripartizione delle acque sul pianeta

Secondo recenti stime fornite dall’USGS (United States Geological Survey), agenzia scientifica del Governo degli Stati Uniti avente come principali obiettivi lo studio del territorio, delle sue risorse naturali e dei rischi che lo minacciano, il volume complessivo delle acque contenute sul nostro pianeta presenta un valore finito, pari a 1˙386 milioni di km^3; di questi, 1˙351 milioni sono costituiti da acque salate mentre i rimanenti 35 milioni sono invece rappresentati da acque dolci, pari rispettivamente al 97,47% e al 2,53% del valore totale.

La frazione volumica costituita dalle acque dolci del pianeta può essere a sua volta suddivisa nei seguenti quattro contributi principali:

- 69,71%, pari a 24,4 milioni di km^3, è costituita da ghiacciai e nevi perenni ed è concentrata prevalentemente nel continente Antartico e nella regione Artica, nonché in misura notevolmente minore sulle principali catene montuose o ancora sotto forma di permafrost in Siberia e in alcune zone dell'America settentrionale, volume che ricopre approssimativamente il 10% del suolo mondiale. Questa risorsa idrica presenta però il grave svantaggio di essere collocata a grande distanza dagli insediamenti umani e risulta pertanto difficilmente accessibile all'uso: in particolare, oltre il 96% dell'acqua dolce allo stato solido è situata ai poli, mentre la frazione rimanente è distribuita su una superficie ricoperta di ghiacciai per un'estensione complessiva di oltre 550˙000 km^2 di ghiacciai;

- 29,52%, corrispondente a circa 10,3 milioni di km^3, è invece contenuta all'interno degli acquiferi: questo termine fa riferimento all'acqua che circola all'interno del sottosuolo e costituisce la tipologia di risorsa idrica più facilmente disponibile, in quanto rappresenta più del 97% del volume totale di acqua dolce utilizzabile; è al tempo stesso la principale fonte di approvvigionamento idrico, in quanto si stima che oltre due miliardi di persone dipendano esclusivamente dall'acqua sotterranea per il proprio sostentamento. Il totale delle acque sotterranee prelevate annualmente è quantificato tra 750 e 800 km^3 ed è pari a quasi il 20% del totale della risorsa idrica prelevata;

- 0,56%, equivalente a oltre 196˙000 km^3, è costituita dalle acque superficiali ed è quindi, al pari della categoria precedente, direttamente disponibile all'utilizzo. E' possibile ripartire ulteriormente tale frazione volumica nelle tre seguenti sottocategorie:

    - Corsi d'acqua: forniscono un volume complessivo di acqua pari a 2˙115 km^3 e sono definite come masse d'acqua dolce che scorrono sulla superficie terrestre guidate dalla forza di gravità, tali da formare un mosaico idrologico, costituito da 263 bacini idrografici principali che interessano il 45,3% delle terre emerse. Un recente studio condotto da due università americane (Chapel Hill nella Carolina del Nord e A&M University nel Texas) ha dimostrato che i corsi d'acqua del nostro pianeta ricoprono un'area superiore del 45% rispetto a quanto rilevato dai due studi precedentemente eseguiti: l'estensione superficiale dei fiumi e dei torrenti è pertanto aumentata da 533˙000 km^2 a 773˙000 km^2, con un'incertezza del ±10%. Questa indagine è stata eseguita incrociando 7˙376 fotografie scattate dai satelliti della costellazione Landsat, misurazioni sul terreno e dati forniti da modelli statistici ed è tale da produrre ripercussioni non sul volume della riserva idrica globale disponibile, che rimane pressoché invariato, ma sull'importanza dei corsi d'acqua, che con il loro moto turbolento costituiscono aree di fondamentale importanza per lo scambio chimico dei gas tra l'acqua e l'atmosfera;

- Laghi: sono grandi masse d’acqua raccolte nelle cavità terrestri, il cui equilibrio idrologico è garantito grazie all’apporto di corsi d’acqua immissari, sorgenti, ghiacciai e precipitazioni, mentre il deflusso avviene attraverso fiumi emissari e tramite l'evaporazione. Queste riserve di acqua dolce vengono storicamente impiegate per l'irrigazione dei campi, nonché come fonti di acqua potabile e, in misura minore, anche per la produzione di energia elettrica. La loro distribuzione geografica è estremamente eterogenea, in quanto la maggior parte dei laghi d’acqua dolce sono collocati nell’emisfero boreale e alle alte latitudini, con quasi la metà dell’estensione complessiva dei laghi mondiali concentrata esclusivamente sul territorio canadese. Molti laghi, specialmente quelli situati nelle regioni più aride del pianeta, diventano salati a causa della forte evaporazione: ne è un esempio il lago d'Aral, che nel 1960 era il 12° del mondo con un volume complessivo di circa 1˙100 km^3; tuttavia le sue dimensioni si sono ridotte notevolmente, fino a raggiungere nel 2007 un volume pari al 10% di quello originale, con successiva suddivisione in tre laghi minori;

- Wetlands o zone umide: questo termine fa riferimento in maniera generale a qualsiasi tipo di ambiente naturale caratterizzato dalla compresenza di acqua e di terreno; la definizione più dettagliata di wetlands è però la seguente: “Le paludi e gli acquitrini, le torbiere oppure i bacini, naturali o artificiali, permanenti o temporanei, con acqua stagnante o corrente, dolce, salmastra, o salata, ivi comprese le distese di acqua marina la cui profondità, durante la bassa marea, non supera i sei metri” (Convenzione Internazionale di Ramsar, Iran, 2 febbraio 1971). Le più grandi zone umide del pianeta sono situate lungo il corso del Rio delle Amazzoni, nella Siberia orientale e presso la Baia di Hudson e ricoprono un’estensione pari rispettivamente a 800˙000 km^2, 780˙000 km^2 e 200˙000 - 320˙000 km^2, mentre in Italia i siti Ramsar individuati sono attualmente 51 e occupano una superficie complessiva pari a 60˙052 ettari, corrispondenti a poco più di 600 km^2.

  Le wetlands svolgono un ruolo fondamentale sotto molteplici punti di vista:

  - Idrogeologico: svolgono il compito di contenimento e di attenuazione delle piene dei fiumi creando un effetto spugna, ossia rallentando il deflusso delle acque e riducendo quindi il rischio di alluvioni, che saranno restituite successivamente durante i periodi di magra; fungono inoltre da serbatoi, per garantire la ricarica delle falde acquifere;
  - Biologico: costituiscono la terza tipologia di ambiente più importante per la conservazione della biodiversità, con oltre 146 specie di uccelli a rischio di estinzione la cui sopravvivenza dipende esclusivamente da tale habitat;
  - Produttivo: le wetlands vengono impiegate nel settore dell'ittiocoltura nonché in quello della produzione del sale;

- Scientifico: garantiscono la ricostituzione e il mantenimento dei fenomeni climatici, ecologici ed evolutivi del territorio in cui questi ambienti sono collocati.

- 0,21% nell'atmosfera: secondo i dati riportati dalla FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), l'altezza media di pioggia a livello globale è stimata in circa 799 mm annui; moltiplicando tale valore per l'estensione delle terre emerse, pari a 148˙900˙000 km^2, si ottiene che il volume di pioggia media annua al suolo è di poco inferiore a 119˙000 km^3; oltre il 62% di tale valore, corrispondente a circa 74˙000 km^3, ritorna nell'atmosfera sotto forma di vapore acqueo mentre il 38%, ovvero i rimanenti 45˙000 km^3, confluisce nelle acque superficiali oppure si infiltra nel terreno alimentando di conseguenza le falde acquifere.

Le acque superficiali e quelle contenute negli acquiferi rappresentano ciò che è comunemente definito risorse idriche: tale quantità non è però accessibile nella sua totalità, in quanto una percentuale non trascurabile viene dispersa inevitabilmente durante le piene stagionali, mentre una frazione ancora maggiore deve essere mantenuta per garantire il deflusso minimo vitale; questo termine indica la portata istantanea che deve essere determinata in ogni tratto omogeneo di un corso d'acqua in modo da garantire la salvaguardia delle caratteristiche fisiche del corpo idrico e delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque, nonché il mantenimento della naturale integrità ecologica, seppur con popolazione ridotta, con particolare riferimento alla tutela della vita acquatica. Viene pertanto stimato che un valore compreso tra 9˙000 e 14˙000 km^3 costituisca il volume complessivo delle risorse idriche di cui l'umanità possa disporre a costi accessibili: questo dato continua inoltre a ridursi pericolosamente, sia a causa dello scarico nei corpi idrici recettori di sostanze inquinanti sia come diretta conseguenza delle precipitazioni, che tendono a diventare sempre meno frequenti e al contempo più intense.

Nella tabella seguente è riportata la ripartizione del volume idrico totale nei singoli contributi:

Tipologia	***Volume*** [km^3]	***Frazione del volume totale [%]***	***Frazione del volume di acqua dolce [%]***
Acque salate	1˙351˙000˙000	97,47%	/
Acque dolci	35˙000˙000	2,53%	100%
Ghiacciai e nevi perenni	24˙400˙000	1,76%	69,71%
Acquiferi	10˙300˙000	0,75%	29,52%
Acque superficiali	196˙000	0,014%	0,56%
Vapore acqueo	74˙000	0,005%	0,21%
Totale	1˙386˙000˙000	100%	/

Tabella 1.1: Ripartizione dei volumi idrici su scala globale.

1.2 Fattori che riducono la disponibilità idrica

Risulta evidente che solo una percentuale minima, compresa tra 0,026% e 0,04% del volume totale delle acque dolci presenti sul nostro pianeta costituisca la risorsa idrica rinnovabile disponibile annualmente; tale valore deve essere confrontato direttamente con il prelievo idrico mondiale che, in base a quanto riportato dalla FAO, nel 2010 si assestava a circa 4˙300 km^3 annui.

A peggiorare la situazione problema concorrono diversi fattori: il primo aspetto tale da determinare un maggiore consumo annuo globale della risorsa idrica è rappresentato dall'incremento esponenziale della popolazione mondiale, stimata nell'ottobre 2019 dall'United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA, Dipartimento per gli affari economici e sociali dell'ONU) in poco più di 7,7 miliardi di individui; questo dato è però destinato ad aumentare con una velocità sempre maggiore, tanto che il modello probabilistico elaborato dal dipartimento sopracitato con i dati relativi all'arco temporale compreso tra il 1950 e il 2019 stima, con un'accuratezza dell'80%, che il numero di abitanti del pianeta nell'anno 2100 sarà compreso tra 10 e 12 miliardi, con un valore mediano pari a circa 11 miliardi; le stime più pessimistiche prevedono invece una crescita ancora più rapida, fino a sfiorare i 16 miliardi di persone entro la fine del secolo.

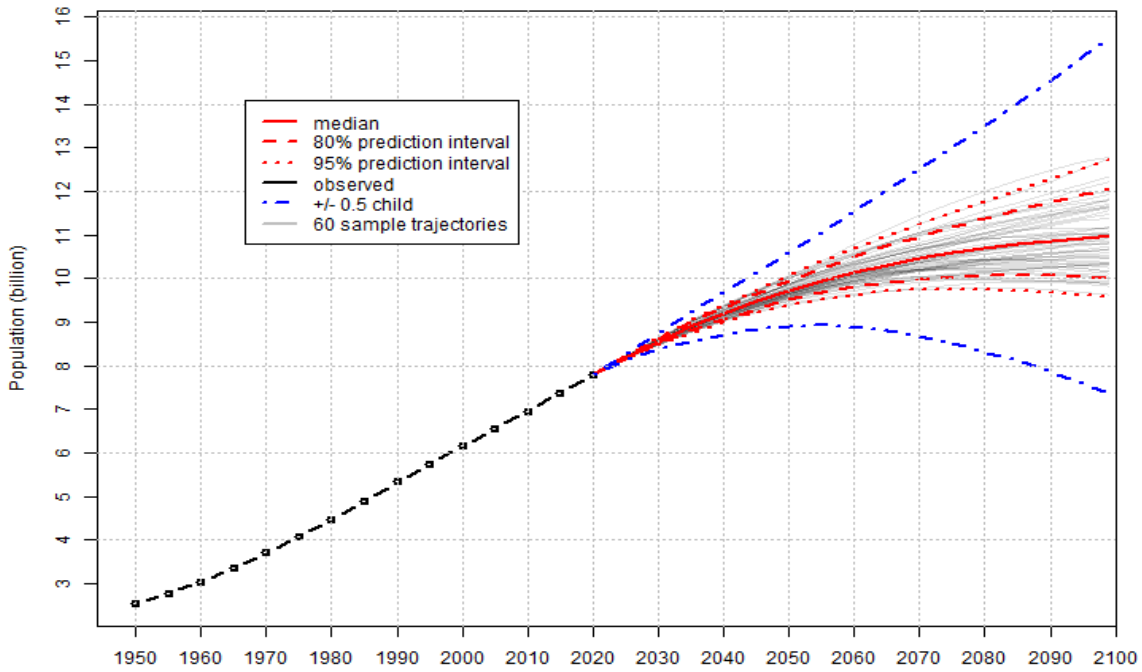

Figura 1.1: Andamento temporale della popolazione mondiale dal 1950 al 2100 [Fonte: United Nations, DESA, Population Division, 2019].

Parallelamente alla riduzione del volume della risorsa idrica pro capite disponibile, provocata dalla graduale crescita demografica, con conseguenze dirette sull’aumento della domanda per esigenze agricole, industriali, civili ed energetiche, il secondo elemento che sta contribuendo a determinare un maggiore consumo idrico annuo a livello globale è il miglioramento della qualità di vita; a titolo di esempio, è possibile osservare come, nell’arco temporale di un solo secolo, i consumi annui pro capite a livello mondiale siano cresciuti da un valore stimato di circa $350\,m^3$ nel 1900 a $643\,m^3$ nel 2000: tutto ciò ha determinato pertanto, oltre che un crollo della disponibilità idrica per abitante, anche un notevole incremento della sua domanda.
Il principale parametro che viene impiegato per stimare la qualità di vita della popolazione, e quindi anche il maggiore consumo idrico annuo a livello globale, è l’Indicatore di Sviluppo Umano, meglio noto come ISU o HDI (Human Development Index): tale indice è stato utilizzato a partire dal 1993 dall’UNPD (Programma delle Nazioni Unite per lo sviluppo) in modo tale da definire il tasso di crescita economica di un Paese nel modo più efficace possibile. Tale parametro è valutato come media dei 3 seguenti fattori:

- Reddito, definito dal Prodotto Interno Lordo (PIL) individuale;
- Livello di sanità, rappresentato dalla speranza di vita alla nascita;
- Livello di istruzione, valutato a partire dall’indice di alfabetizzazione degli adulti e dal numero effettivo degli anni di studio.

Ognuno dei precedenti parametri può assumere tutti i valori compresi nell’intervallo chiuso e limitato [0;1] ed è calcolato per mezzo della formula di seguito riportata:

$$ISU = \frac{VP - vm}{VM - vm}, \tag{1.1}$$

con:

- VP : valore osservato nella nazione di riferimento;
- vm : valore minimo osservabile;
- VM : valore massimo osservabile.

A dimostrazione di quanto riportato in precedenza, si è dimostrato come lo sviluppo incontrollato delle attività industriali, specialmente nei Paesi emergenti, stia ponendo una seria minaccia nei confronti della risorsa idrica disponibile: la qualità dell’acqua utilizzabile per svolgere una qualsiasi attività industriale può essere infatti notevolmente inferiore rispetto a quella impiegata per fini agricoli o di sussistenza, determinando pertanto un notevole risparmio idrico; questo tema costituirà sempre di più l’oggetto di dispute e di conflitti di natura interna che andranno sommarsi a quelli di natura geopolitica che vedono coinvolti gli Stati. Svincolare l’utilizzo dell’acqua dalla crescita economica risulta fattibile: l'IRP (International Resource Panel), gruppo scientifico che mira a conseguire un utilizzo sostenibile delle risorse naturali, ha dimostrato che tale disaccoppiamento si

sta già attuando in Australia, dove il consumo di acqua è diminuito del 40% tra il 2001 e il 2009 in controtendenza all'andamento dell'economia, cresciuta di oltre il 30% nello stesso periodo di tempo.

Il disaccoppiamento del consumo della risorsa idrica dalla crescita economica è già in atto, seppure in modo ancora parziale, nei Paesi con un livello socio-economico più elevato: è infatti possibile osservare nella tabella sottostante come le conseguenze di questo processo di trasformazione siano già in corso, producendo risultati apprezzabili e in alcuni notevoli; tali valori sono stati ottenuti analiticamente, incrociando i dati riferiti ai prelievi idrici annui pro capite con quelli relativi all'Indicatore di Sviluppo Umano (HDI) relativamente a 10 Stati che hanno intrapreso questo processo di risparmio idrico, forniti rispettivamente dall'OCSE e dall'ONU e relativi all'arco temporale 1997-2015:

Stato	***Indice HDI*** $[-]$			***Prelievi idrici annui pro capite*** $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$		
	1997	***2015***	***Variazione*** $[\%]$	***1997***	***2015***	***Variazione*** $[\%]$
Australia	0,889	0,929	+4,50	1˙309,1	759,3	-42,00
Belgio	0,862	0,905	+4,99	752,1	353,8	-52,96
Canada	0,862	0,908	+5,34	1˙411,5	883,5	-37,41
Danimarca	0,843	0,924	+9,61	176,7	152,2	-13,87
Francia	0,834	0,886	+6,24	521,3	436,3	-16,31
Germania	0,844	0,928	+9,95	510,6	302,2	-40,81
Giappone	0,848	0,895	+5,54	699,1	623,9	-10,76
Israele	0,835	0,901	+7,90	322,4	143,5	-55,49
Repubblica Ceca	0,774	0,882	+13,95	241,1	151,2	-37,29
Svezia	0,874	0,929	+6,29	305,7	243,2	-20,44

Tabella 1.2: Risultati del risparmio idrico conseguente al processo di decoupling [Fonti: United Nations Development Programme; Organization for Economic Co-operation and Development].

Il modo più conveniente per conseguire il disaccoppiamento nel settore idrico, secondo quanto indicato in un recente rapporto dell'IRP (International Resource Panel), è che i governi mettano in atto piani sostenibili di gestione delle acque, tali da tenere in considerazione l'intero ciclo delle stesse: adduzione, distribuzione, utilizzo, trattamento, riutilizzo e ritorno nell'ambiente.

Per conseguire il “decoupling”, ossia il disaccoppiamento del consumo della risorsa idrica dalla crescita economica, il precedente rapporto fornisce le linee guida di seguito indicate:

- investire maggiormente in ricerca e sviluppo in modo tale da migliorare le tecnologie che permettono di ridurre gli sprechi idrici;
- realizzare infrastrutture durature nel tempo allo scopo di aumentare l’efficienza nell’utilizzo delle acque e ridurre al contempo la contaminazione e l’inquinamento delle risorse idriche;
- introdurre politiche volte a riassegnare in modo prioritario la risorsa idrica a quei settori tali da produrre beni e servizi più utili alla società, garantendo contemporaneamente che i gruppi sensibili siano protetti;
- rafforzare le attività di ricerca sul valore dell’acqua, in modo da garantire il benessere umano e incrementare al contempo lo sviluppo economico;
- comprendere come il commercio internazionale possa essere impiegato per realizzare il disaccoppiamento dell’utilizzo delle risorse idriche dalla crescita economica, specialmente nei settori dove più è necessario.

Occorre poi sottolineare come l’acqua sia distribuita sul territorio mondiale in maniera estremamente eterogenea, facendo sì che la sua disponibilità vari enormemente sia a livello continentale che per quanto concerne le varie fasce climatiche; esistono infatti aree della Terra dove la risorsa idrica è estremamente concentrata, mentre nelle zone semi aride, aride e desertiche essa è quasi assente. Questa disomogeneità è accompagnata da cambiamenti climatici a livello globale, tali da determinare una distribuzione eterogenea delle precipitazioni, sia per quanto riguarda la scala spaziale che quella temporale: l’alternarsi di fenomeni alluvionali brevi e intensi e di periodi di siccità prolungati determina, principalmente negli Stati caratterizzati da un reddito pro capite medio-basso, persistenti problemi di carenza idrica.

Le cause relative alla scarsità delle piogge sono numerose e variabili; al tempo stesso la ciclicità dei fenomeni siccitosi è scarsamente prevedibile, in quanto è collegata a fattori sia antropici che naturali, tra cui gli andamenti dei sistemi di alta pressione, che a loro volta condizionano le direzioni dei venti e incidono sullo spostamento di masse d'aria secche o umide dagli oceani, influendo così direttamente sulle precipitazioni. I periodi siccitosi possono essere poi dovuti anche ad altri fattori, come ad esempio le eruzioni vulcaniche, la deforestazione, il progressivo scioglimento dei ghiacciai nelle zone temperate, i cicli termici oceanici e le emissioni in atmosfera di sostanze inquinanti, tali da condizionare la formazione degli ammassi nuvolosi e quindi delle precipitazioni. La relazione tra le alte temperature e la mancanza di piogge non è diretta, ma ovviamente l'incremento termico può incidere in maniera notevole sull'effettiva disponibilità di acqua per effetto dell'evaporazione: l'aumento delle temperature ha iniziato ad assumere un livello significativo a partire dalla metà del XIX secolo ed è tale da determinare prelievi idrici sempre più cospicui, anche in funzione della crescita demografica prevista e del connesso incremento dei fabbisogni di acqua.

Nel diagramma sottostante è riportato, a titolo di esempio, l’andamento temporale della temperatura su scala globale, ottenuta tramite l’interpolazione dei dati annuali, e i sei principali contributi: è possibile osservare come l’incremento termico abbia ormai raggiunto un valore di circa 1,5 ºC rispetto al 1850, ossia in un intervallo temporale di quasi 170 anni, con una crescita ancora più accentuata a partire dagli anni’70, mentre i fattori principali che hanno contribuito a definire questa tendenza sono principalmente le emissioni in atmosfera dei gas serra e, in misura minore, l’assottigliamento dello strato di ozono stratosferico.

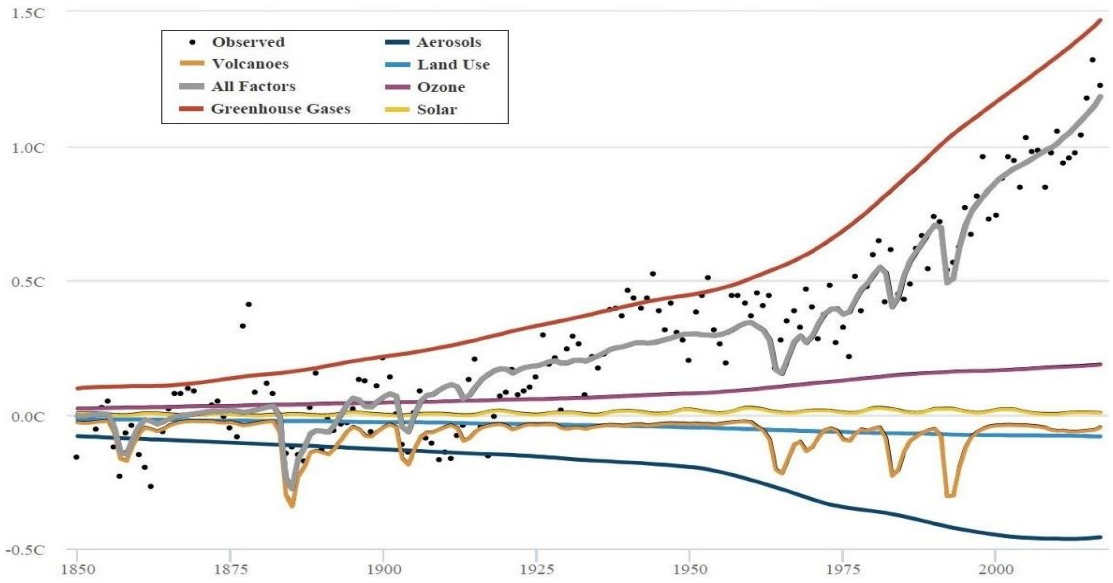

Figura 1.2: Evoluzione temporale della temperatura globale dal 1850 al 2019 [Fonte: www.comitatoscientifico.org, 2019].

1.3 Disponibilità idrica su scala globale

Il problema della carenza dell’apporto idrico utilizzabile riguarda, in maniera sempre più diffusa, vaste aree del pianeta, in particolare l’Africa e parte dell’Asia, dove l’insufficienza cronica di acqua colpisce oltre il 77% delle nazioni, le quali ospitano circa il 40% della popolazione mondiale; gli Stati sottoposti a maggiore carenza idrica sono inoltre in costante aumento e sono concentrati prevalentemente nel Nord Africa e nell’Asia occidentale.

A dimostrazione di quanto precedentemente riportato è possibile fare riferimento alla seguente tabella, che mette in evidenza tali squilibri riportando l’andamento, in un arco temporale di oltre 50 anni, della risorsa idrica disponibile pro capite sia su scala globale che a livello subcontinentale, nonché per le diverse realtà nazionali:

Subcontinente o Stato	*Risorsa idrica annua disponibile* $\left[\frac{km^3}{anno}\right]$	*Risorsa idrica disponibile pro capite* $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$		
		1962	*2014*	*Variazione* [%]
Mondo	42˙104,18	13˙364,62	5˙929,86	-55,63
Europa	2˙178,39	3˙527,55	2˙960,96	-16,06
Africa Sahariana	138,49	2˙075,45	553,39	-73,34
Africa Subsahariana	4˙078,28	17˙685,81	4˙008,41	-77,34
Nord America	5˙829,46	27˙628,30	16˙019,27	-42,02
America latina e caraibi	13˙917,28	59˙769,53	22˙510,55	-62,34
Asia orientale	8˙060,79	9˙684,75	4˙522,05	-53,31
Sud-est asiatico	757,26	3˙345,94	1˙147,33	-65,71
Algeria	11,25	968,17	289,03	-70,15
Arabia Saudita	2,40	550,11	77,63	-85,89
Australia	487,47	45˙801,53	20˙957,54	-54,24
Brasile	5˙660,98	73˙986,14	27˙919,19	-62,26
Canada	2˙847,40	153˙110,56	80˙423,43	-47,27
Cina	2˙882,01	4˙225,18	2˙061,91	-51,20
Egitto	1,80	64,03	19,91	-68,91
India	1˙446,00	3˙082,65	1˙116,08	-63,79
Niger	3,50	975,41	181,91	-81,35

Tabella 1.3: Evoluzione della risorsa idrica pro capite disponibile nel mondo [Fonti: World Bank, 2018; United Nations, 2019].

Ricordando che l'acqua è una fonte rinnovabile e che presenta pertanto un valore ritenuto complessivamente stabile nel tempo, i risultati precedenti sono particolarmente significativi, soprattutto tenendo conto del fatto che in un intervallo di tempo relativamente contenuto la risorsa idrica pro capite disponibile ha subito un decremento notevole, variabile tra un minimo del 16,06% e un massimo del 85,89%; appare inoltre di tutto rilievo osservare che la maggiore decrescita della disponibilità idrica si sia manifestata in quei Paesi dove la carenza fisiologica della riserva d'acqua presentava sin dall'inizio livelli assai preoccupanti, attribuendo quindi ulteriore importanza a questo fenomeno.

E' infine possibile notare, ammettendo che anche la qualità dell'acqua sia rimasta invariata nel tempo, cioè senza tenere in considerazione la riduzione delle sue caratteristiche per effetto dell'inquinamento, che a fronte di una disponibilità idrica complessivamente costante negli anni l'aumento della popolazione costituisce il principale fattore tale da determinare una progressiva riduzione del valore pro capite disponibile.

1.4 Disponibilità idrica su scala europea

Per quanto concerne invece l'ambito europeo è possibile osservare che, sebbene nel vecchio continente la riduzione della risorsa idrica sia caratterizzata da valori piuttosto contenuti, le variazioni dei dati relativi alle singole realtà nazionali sono piuttosto eterogenei e in alcuni casi per nulla confortanti; i risultati complessivi sono elencati nella tabella sottostante:

Stato	***Risorsa idrica disponibile*** $\left[\frac{km^3}{anno}\right]$	***Risorsa idrica disponibile pro capite*** $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$		
		1962	***2014***	***Variazione*** [%]
Europa	2˙178,39	3˙527,55	2˙960,96	-16,06
Belgio	12,08	1˙301,44	1˙070,56	-17,74
Bulgaria	21,02	2˙620,76	2˙907,00	+10,92
Francia	195,83	4˙174,94	3˙015,86	-27,76
Germania	107,67	1˙445,44	1˙321,27	-8,59
Italia	180,93	3˙586,90	3˙002,18	-16,30
Malta	0,05	155,91	116,21	-25,46
Olanda	10,96	931,75	652,24	-30,00
Polonia	53,74	1˙768,48	1˙410,09	-20,27
Regno Unito	144,62	2˙723,00	2˙244,12	-17,59
Spagna	111,39	3˙584,40	2˙392,38	-33,26
Svezia	171,41	22˙614,30	17˙635,94	-22,01
Ungheria	6,00	596,32	608,12	+1,98

Tabella 1.4: Evoluzione della risorsa idrica pro capite disponibile in Europa [Fonti: World Bank, 2018; United Nations, 2019].

Dall’analisi dei dati precedenti emerge immediatamente che Ungheria e Bulgaria sono gli unici due Stati in cui la disponibilità idrica è aumentata nell’intervallo temporale considerato: questa è una condizione che accomuna più in generale tutti i Paesi dell’Europa orientale ed è determinata principalmente dalla decrescita demografica; tutte le altre nazioni presentano invece una riduzione della riserva idrica annua pro capite, passando da valori più confortanti come nel caso della Germania fino a crolli significativi, come avviene per Francia, Olanda e Spagna. La Svezia mostra inoltre, nonostante una flessione superiore al 22%, una disponibilità d’acqua elevatissima e può essere pertanto definita, al pari degli altri Paesi dell’area scandinava, il “serbatoio d’acqua dolce d’Europa”. Un’ultima osservazione riguarda infine Malta, che è caratterizzata da una riserva idrica pro capite estremamente bassa e confrontabile pertanto con quella degli Stati dell’Africa sahariana: questa è una condizione comune alla quasi totalità delle realtà insulari del Mediterraneo ed è legata soprattutto alle precipitazioni medie annue, che si attestano su valori dell’ordine di circa 500 mm, con una conseguente carenza idrica fisiologica.

1.5 Disponibilità idrica su scala nazionale

Per quanto riguarda la situazione idrica dell'Italia occorre evidenziare come, rispetto agli altri Stati del Vecchio Continente, il nostro Paese sia caratterizzato da una condizione relativamente favorevole sia per quanto concerne la disponibilità teorica della risorsa idrica rinnovabile che per quanto riguarda il relativo valore pro capite: le stime del 2014 riportano infatti una disponibilità annua pro capite di poco superiore a $3^{\cdot}000\,m^3$, una quantità maggiore rispetto alla media europea. Al tempo stesso però vari fattori tra cui le perdite idriche naturali, legate principalmente all’evapotraspirazione, nonché le difficoltà di captazione e le condizioni inadeguate in cui versano le infrastrutture che compongono la rete idrica italiana abbassano la disponibilità complessiva dai quasi 181 km^3 annui teoricamente disponibili ai soli 57 km^3 effettivamente utilizzabili.
Uno dei fattori che contribuisce, soprattutto negli ultimi decenni, a ridurre ulteriormente la disponibilità idrica a livello nazionale, è rappresentato dai cambiamenti climatici: nonostante in Europa non ci sia ancora un’opinione comune relativamente a questo tema, in Italia vi è invece piena intesa nell’ammettere che sia le precipitazioni che le temperature abbiano assunto in questi ultimi anni un andamento quasi di tipo tropicale. A causa della sua particolare collocazione geografica, il nostro Paese è infatti molto esposto agli effetti negativi prodotti dai fenomeni climatici estremi: è quindi necessario investire in nuove infrastrutture per favorire un migliore adattamento delle città alle condizioni climatiche in continuo mutamento. Si è osservato che negli ultimi 20 anni la superficie del territorio nazionale colpita da fenomeni siccitosi è cresciuta dall'8% al 20% mentre, per quanto riguarda l’utilizzo della risorsa idrica, si è rilevato un aumento della domanda di acqua sia per gli usi civili che per l’industria, l'artigianato e, in particolare, il turismo: quest’ultimo settore costituisce

infatti il principale rivale, in termini di consumi, dell'agricoltura, in quanto determina un aumento della richiesta di acqua in estate, periodo di maggiore stress idrico.

I dati più recenti relativi alla disponibilità idrica in Italia sono quelli forniti da un'indagine statistica eseguita nel 1999 dal CNR-IRSA (Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Ricerca Sulle Acque), che hanno effettuato una stima dei volumi di acqua disponibili, suddivisi per compartimento idrografico e ripartiti tra risorse idriche superficiali e sotterranee; i risultati ottenuti da questa elaborazione sono elencati nella tabella sottostante:

Compartimento idrografico	***Risorsa idrica superficiale utilizzabile*** $\left[\frac{km^3}{anno}\right]$	***Risorsa idrica sotterranea utilizzabile*** $\left[\frac{km^3}{anno}\right]$	***Risorsa idrica totale utilizzabile*** $\left[\frac{km^3}{anno}\right]$	***Risorsa idrica pro capite utilizzabile*** $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$
NORD	27,429	6,496	33,925	1˙336,42
Bacino del Po	16,118	4,468	20,586	1˙296,30
Triveneto	10,939	1,721	12,660	1˙928,64
Liguria	0,372	0,307	0,679	424,93
CENTRO	5,391	2,434	7,825	718,86
Emilia Romagna - Marche	0,995	0,620	1,615	354,41
Toscana	0,543	0,440	0,983	281,63
Lazio - Umbria	1,399	1,126	2,525	424,90
Abruzzo - Molise	2,454	0,248	2,702	1˙705,14
SUD	4,274	1,849	6,123	437,56
Puglia	0,523	0,325	0,848	209,80
Campania	1,237	0,929	2,166	378,51
Calabria - Basilicata	2,514	0,595	3,109	1˙175,63
ISOLE	2,579	1,368	3,947	593,95
Sicilia	0,738	1,151	1,889	377,54
Sardegna	1,841	0,217	2,058	1˙253,41
ITALIA	39,673	12,146	51,819	910,56

Tabella 1.5: Stima delle risorse disponibili in Italia per compartimento idrografico [Fonti: CNR - IRSA, 1999; Istat, 1999].

Sulla base di quanto precedentemente riportato, è possibile comprendere come la distribuzione della risorsa idrica sia caratterizzata da valori estremamente variabili, non solo per quanto riguarda la scala globale e quella continentale ma anche a livello nazionale e regionale: in Italia la maggior parte della risorsa idrica utilizzabile annualmente da ogni abitante è concentrata al Nord, con punte superiori a $1^{\cdot}900\,m^3$ nel Triveneto, mentre i valori diminuiscono progressivamente al diminuire della latitudine, con volumi più bassi al Sud e in particolare in Puglia.

Secondo una recente statistica elaborata da Utilitalia, federazione che riunisce le aziende operanti nei servizi pubblici dell'acqua, dell'ambiente, dell'energia elettrica e del gas, in Italia sono necessari circa 7,2 miliardi di euro di investimenti in modo da poter garantire nei prossimi anni un approvvigionamento idrico idoneo. In particolare, per arginare il problema, le risorse economiche dovrebbero essere ripartite geograficamente nelle seguenti proporzioni:

- 1,3 miliardi € al Nord;
- 1,9 miliardi € al Centro;
- 3,9 miliardi € al Sud e nelle Isole.

Complessivamente gli investimenti infrastrutturali previsti, che devono essere realizzati per far fronte alla carenza idrica, sono oltre 700 e determinano un esborso annuale di oltre 6,61 miliardi di euro, pari a circa 50 euro pro capite relativamente ad un intervallo temporale di 4 anni; queste infrastrutture consistono nella realizzazione di nuovi serbatoi, nel riutilizzo delle acque reflue e nell’attuazione di interventi mirati per ridurre le dispersioni all’interno delle reti acquedottistiche. Gli investimenti già pianificati possono essere suddivisi nelle seguenti sei categorie:

- 46,9%, pari a circa 3,1 miliardi €, sono destinati a interventi necessari alla costruzione di collegamenti di schemi idrici;
- 34,8%, corrispondente a 2,3 miliardi €, impegnato per la riduzione delle dispersioni;
- 9,2%, ossia 606 milioni €, utilizzato nella realizzazione di nuovi approvvigionamenti idrici;
- 5,4%, pari a 359 milioni €, per la costruzione di serbatoi e invasi;
- 3,0%, pari a 202 milioni €, per l’installazione di dissalatori;
- 0,7%, pari a 43 milioni €, per il riutilizzo delle acque reflue.

1.6 Crisi mondiale dell’acqua

La risorsa idrica si sta trasformando progressivamente in un bene sempre più raro: è quindi possibile parlare di “crisi idrica”, definita come “lo stato temporaneo di interruzione nella distribuzione e nella conservazione di acqua in un dato territorio”: tutti i più recenti rapporti internazionali denunciano infatti la crisi mondiale dell’acqua, determinata sia dal crescente divario tra domanda e offerta di acqua che dal depauperamento dei grandi bacini idrografici mondiali e delle falde acquifere. Questa emergenza assume connotati ancora più rilevanti nei Paesi emergenti, dove la carenza di acqua potabile è dovuta, oltre che alle motivazioni precedentemente esposte, anche alla carenza fisiologica di investimenti nei sistemi di approvvigionamento idrico e ad una insufficiente manutenzione degli stessi; questo comporta che, in tali Stati, fino all’80% dell’acqua convogliata all’interno della rete acquedottistica venga sprecata soprattutto per l’elevato stato di degrado delle condotte, nonché a causa di allacciamenti illegali e di atti vandalici.

A conferma di quanto la crisi idrica sia diventata un’emergenza prevista ormai da anni, è possibile osservare che già nel 2000, su una popolazione mondiale stimata in circa 6 miliardi di individui, erano previste le seguenti cinque fasce sociali relativamente alla risorsa d’acqua disponibile:

- 16,3%: sovrabbondanza d’acqua;
- 16,7%: relativa sufficienza d’acqua;
- 34,7%: condizioni di insufficienza idrica;
- 24,5%: condizioni di stress idrico;
- 7,8%: condizioni di scarsità idrica,

fissando come valore di sufficienza dell’approvvigionamento idrico giornaliero pro capite i 20 litri, con un punto di prelievo collocato ad una distanza inferiore al chilometro rispetto al punto di utilizzo.

A livello mondiale, nonostante il 54% di tutta la risorsa idrica disponibile sia utilizzata dagli esseri umani, oltre un miliardo di persone non ha accesso all'acqua potabile mentre 2,5 miliardi, di cui circa il 40% costituito da soli bambini, non possono usufruire di adeguati servizi igienico-sanitari. Le conseguenze dell’assenza di infrastrutture idriche adeguate consistono nell’insorgenza, secondo recenti analisi elaborate dall’Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, World Health Organization), di malattie quali colera, malaria e virus intestinali, che costituiscono la seconda causa di mortalità infantile: si stima infatti che ogni 15 secondi un bambino muoia a causa di malattie connesse alla scarsa qualità idrica, facendo sì che ogni anno la mancanza di acqua potabile produca globalmente più vittime di qualsiasi forma di conflitto.
Si stima che oltre due miliardi di persone nel mondo vivano in Paesi caratterizzati da una situazione di stress idrico: questo significa che il rapporto che intercorre tra l’acqua prelevata complessivamente in un anno e la risorsa idrica totale supera la soglia del 25%. In particolare, l'Africa settentrionale e

l'Asia occidentale presentano livelli di stress idrico superiori al 60%, il che è indice di un’alta probabilità di scarsità idrica nel breve-medio termine.

Per avere una visione complessiva delle dimensioni globali che il fenomeno della crisi idrica sta assumendo è possibile fare riferimento alla mappa tematica di seguito riportata: da essa si può osservare come, in base alle ultime elaborazioni dei dati risalenti al 2007 fornite dall’Istituto Mondiale delle Risorse (WRI), organizzazione no profit di ricerca mondiale nata nel 1982, la scarsità idrica affligga Africa e Asia, in particolare l’Africa sahariana e la penisola arabica, nonché le isole minori dei Caraibi; il precedente termine fa riferimento ad una situazione di vera e propria emergenza, in quanto indica un volume annuo pro capite di acqua disponibile inferiore a $1^{\cdot}000\ m^3$; le condizioni di stress e di vulnerabilità idrica affliggono invece il Corno d’Africa, la Cina, l’India e parte dei Paesi dell’Europa centrale e si riferiscono ad una disponibilità idrica annua pro capite variabile rispettivamente tra $1^{\cdot}000$ e $1^{\cdot}700\,m^3$ e tra $1^{\cdot}700$ e $2^{\cdot}500\,m^3$. I precedenti dati sono compensati con quelli relativi a Russia, Scandinavia, Oceania e alla maggior parte del continente americano, che sono caratterizzati invece da una risorsa idrica più che abbondante.

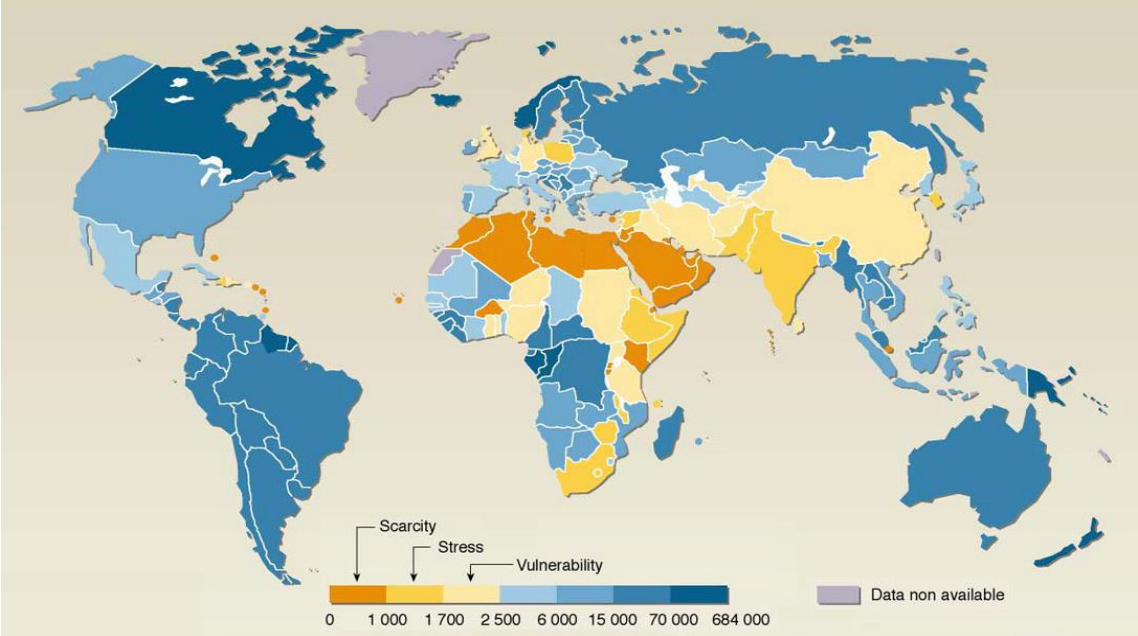

Figura 1.3: Disponibilità idrica pro capite a livello globale nel 2007 $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$

[Fonte: World Resources Institute].

In base alle informazioni riportate da United Nations Water, meccanismo di interazione fondato nel 2003 per coordinare con un obiettivo comune il lavoro delle Nazioni Unite e delle organizzazioni internazionali sui problemi relativi alla risorsa idrica mondiale e ai servizi igienico-sanitari, si stima che nel 2030 il 47% della popolazione mondiale vivrà in zone contrassegnate da uno stress idrico elevato. L'OCSE (Organization for Economic Co-operation and Development) sostiene inoltre che

l'utilizzo dell’acqua sia cresciuto con ritmi più che doppi rispetto al tasso di incremento della popolazione e prevede quindi che la domanda idrica aumenterà globalmente del 55% entro il 2050, a causa dell’aumento della produzione industriale e di quella di energia elettrica nonché del crescente andamento della domanda nel settore agricolo.

I cambiamenti climatici, che caratterizzano questa fase di vita del nostro pianeta, fanno sì che entro il 2030 la crisi idrica obbligherà all’emigrazione un numero compreso tra i 24 milioni e i 700 milioni di persone dalle regioni aride e semi-aride in cui vivono attualmente. Si prevede inoltre che nei prossimi due decenni la domanda d’acqua crescerà del 17%, allo scopo di garantire la coltivazione dei prodotti agricoli necessari a sfamare la popolazione in continua crescita: questo problema riguarda in primo luogo i Paesi emergenti, dove l’incremento delle risorse idriche prelevate potrà raggiungere valori dell’ordine del 40%. Occorrono pertanto buone pratiche di consumo a cui ispirarsi: un esempio proviene da Israele dove, nonostante il problema della scarsità d'acqua sia estremamente importante, si riesce a coltivare nelle aree desertiche e oltre l'85% delle acque reflue domestiche viene trattato e successivamente impiegato per scopi agricoli.

1.7 Concetti di impronta idrica e di acqua virtuale

Contestualmente al problema della crisi idrica globale, si sono diffusi in questi anni i concetti di impronta idrica e di acqua virtuale: questi due termini fanno riferimento ad un indicatore economico introdotto nel 2002 da Arjen Hoekstra e Ashok Chapagain dell’Università di Twente in Olanda per calcolare il consumo di acqua dolce da parte della popolazione. Più dettagliatamente, tale indice tiene in considerazione sia il volume di acqua utilizzata per produrre la materia prima che quello impiegato nei processi necessari a trasformarla in un prodotto disponibile al consumo, determinando quindi l'impatto ambientale sulle risorse idrogeologiche che il nostro stile di vita comporta. La precedente definizione si riferisce non solo ai prelievi idrici relativi alla produzione di beni destinati al consumo interno ma anche all’export: l'acqua consumata per la produzione della merce destinata all'esportazione costituisce infatti il 22% dell'impronta idrica complessiva.

La presa in considerazione dei volumi idrici coinvolti nei processi di import-export può costituire quindi un valido supporto ai singoli Stati per ottenere importanti informazioni sui propri scambi economici, anche sulla base delle disponibilità idriche nazionali: gli Stati con notevoli risorse idriche interne possiedono pertanto il vantaggio commerciale di limitare l'importazione di quei prodotti che necessitano di ingenti volumi idrici nei loro processi realizzativi. La conoscenza dei rapporti di dipendenza idrica di un Paese con l'estero costituisce inoltre un valido supporto per costruire un'autosufficienza alimentare nazionale; in assenza di un impegno comune, la crisi idrica potrebbe

diventare in breve tempo la principale emergenza del pianeta, tale da dare origine a ondate migratorie e a guerre.

Si stima che circa il 76% dei flussi d'acqua virtuali spesi durante i processi di importazione ed esportazione sia associato alla commercializzazione di prodotti agricoli e derivati, carne bovina e prodotti industriali; tra i principali esportatori di acqua virtuale è possibile citare Stati Uniti, Cina, India, Brasile, Argentina e Canada, mentre i maggiori importatori sono invece Stati Uniti, Giappone, Germania, Cina, Italia, Messico e Francia.

L’impronta idrica può essere a sua volta ripartita nei tre seguenti contributi:

- l’impronta idrica blu indica quel volume di acqua dolce, prelevato dalla superficie o dalle falde acquifere, che viene consumato per evaporazione e che pertanto non è più ripristinato oppure è restituito in un secondo momento; in agricoltura questo termine fa riferimento all'acqua utilizzata per l'irrigazione;
- l’impronta idrica verde individua invece quel quantitativo di acqua piovana che, dopo essere stata immagazzinata all’interno del suolo, evapora durante la produzione di un qualsiasi bene;
- l’impronta idrica grigia fa infine riferimento al volume idrico necessario a ridurre la concentrazione delle sostanze inquinanti rilasciate durante i processi produttivi, in modo tale che la qualità delle risorse idriche di una determinata area rimanga al di sopra degli standard idrici di qualità prefissati.

In base a quanto riportato in un recente articolo pubblicato nel 2012 sulla rivista scientifica PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences), ogni essere umano consuma indirettamente, attraverso l’acquisto di prodotti alimentari, di vestiario e di merci, un volume medio pari a $1˙385\,m^3$ d'acqua ogni anno. Questo valore è però ripartito in maniera estremamente eterogenea tra le varie nazioni: il Paese che presenta l’impronta idrica più alta è rappresentato dagli Stati Uniti, con un volume pro capite di acqua utilizzata annualmente pari a circa $2˙842\,m^3$. Nel decennio preso in esame dallo studio, compreso tra il 1996 e il 2005, l'impronta idrica complessiva è stata calcolata in circa 9˙087 miliardi di metri cubi di acqua annui, dei quali ben il 74% fornito dall’acqua piovana; per quanto riguarda invece gli utilizzi, l’agricoltura determina il 92% dei consumi globali, mentre quella industriale e quella domestica richiedono rispettivamente il 4,4% e il 3,6% del volume totale.

I risultati ottenuti dal precedente studio possono essere visualizzati sulle carte tematiche seguenti; in particolare, si può osservare che l’impronta idrica blu risulta essere distribuita sulla superficie del pianeta in maniera piuttosto eterogenea, con picchi nell’Africa sahariana, in Asia minore e in Asia centrale: questi valori sono indicatori di una perdita significativa, in quanto fanno riferimento a quel volume pro capite di acqua dolce che non torna a valle del processo produttivo nella stessa posizione in cui è stato prelevato oppure che vi ritorna, ma in condizioni temporali differite.

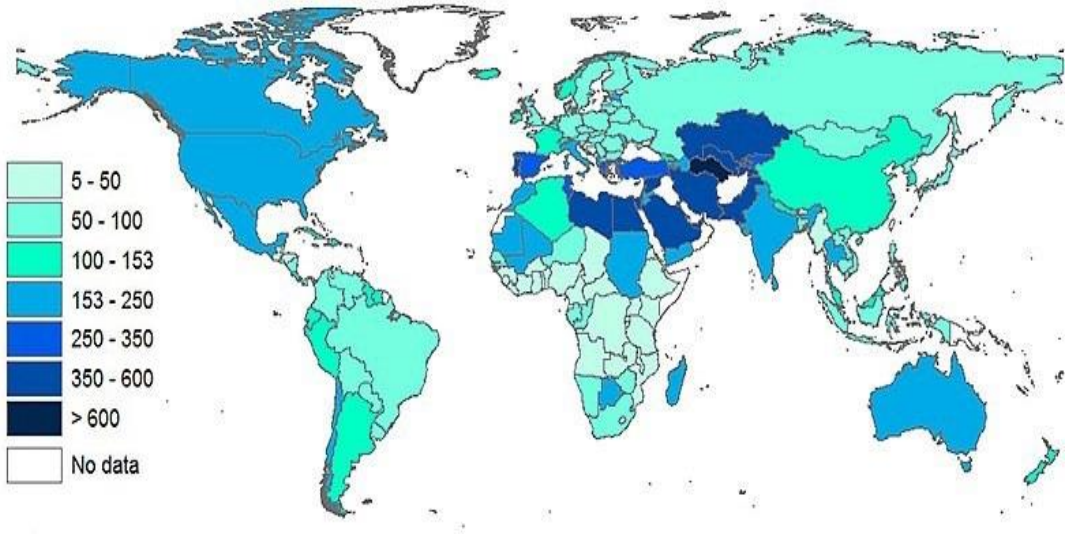

Figura 1.4: Impronta idrica blu nel periodo 1996-2005 $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$

[Fonte: Mekonnen and Hoekstra, PNAS, 28 February 2012].

L'impronta idrica verde è invece distribuita più uniformemente e indica tassi di evapotraspirazione annua pro capite elevati, in genere compresi tra $1^{\cdot}400$ e $2^{\cdot}500\,m^3$, con valori massimi in Bolivia, Mongolia e Niger: questo denota produzioni agricole o estensioni della superficie forestale elevate.

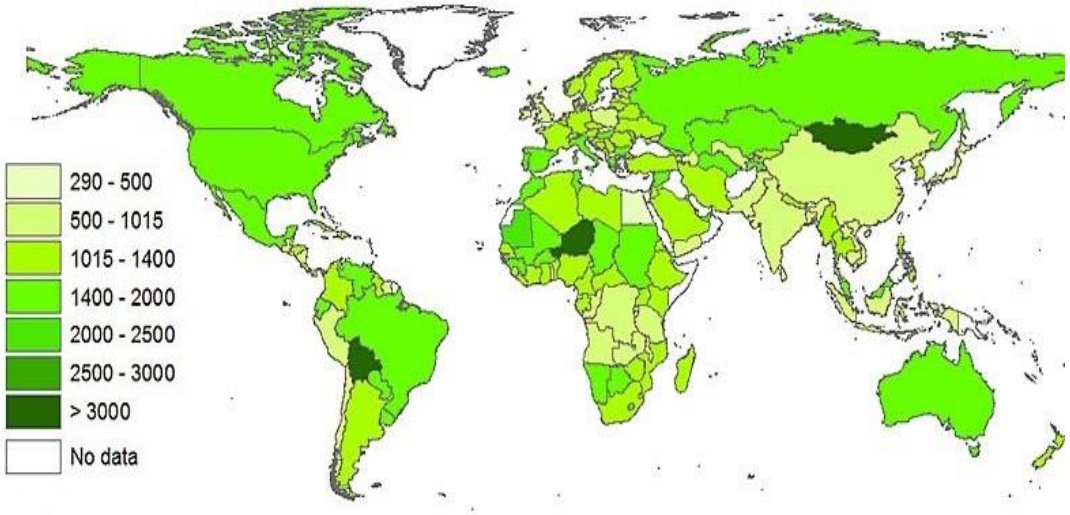

Figura 1.5: Impronta idrica verde nel periodo 1996-2005 $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$

[Fonte: Mekonnen and Hoekstra, PNAS, 28 February 2012].

L'impronta idrica grigia è invece la frazione che presenta la distribuzione geografica più variabile, con volumi annui pro capite estremamente bassi nella quasi totalità del continente africano; i valori di picco si osservano invece principalmente nel Nord America, in Europa, in Oceania e nell'Asia orientale: questa disparità costituisce il principale indicatore del grande divario che permane a livello globale sullo stile di vita.

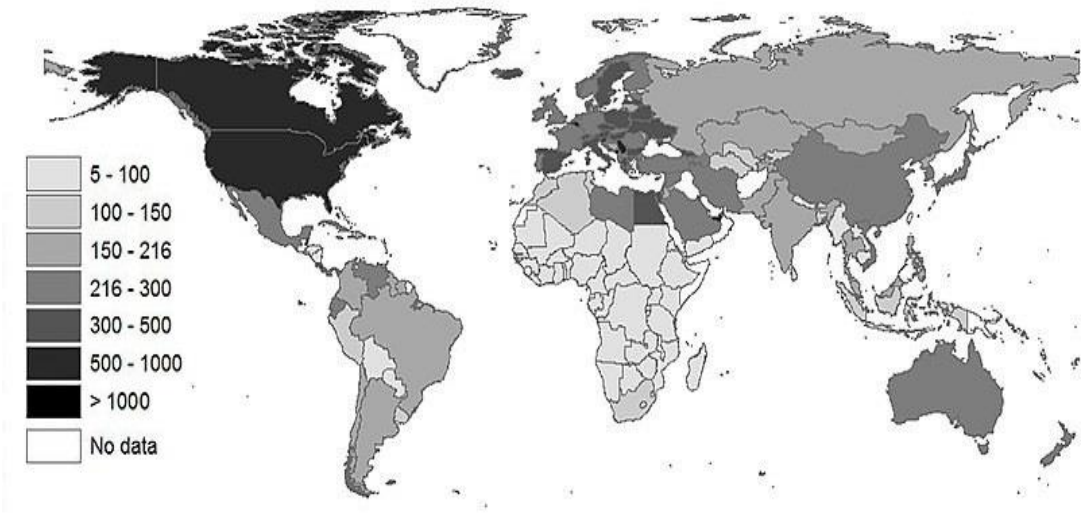

Figura 1.6: Impronta idrica grigia nel periodo 1996-2005 $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$

[Fonte: Mekonnen and Hoekstra, PNAS, 28 February 2012].

Sommando i tre contributi, si nota come l'impronta idrica totale presenti valori molto eterogenei, con picchi osservabili in tutti i continenti; occorre inoltre sottolineare che l'impronta idrica verde offre il maggiore contributo in termini di volume di risorsa idrica annua pro capite spesa, con valori dell'ordine del 65% del totale, e influenza quindi maggiormente i risultati finali: dal confronto tra le due relative carte tematiche, risulta infatti che i valori di picco corrispondono in entrambe.

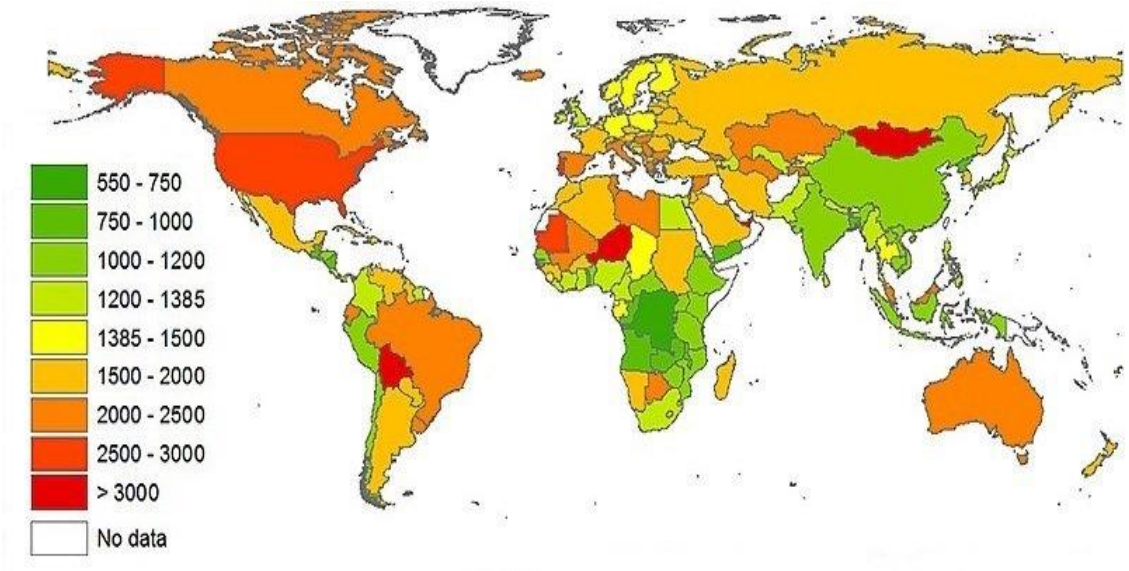

Figura 1.7: Impronta idrica totale nel periodo 1996-2005 $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$

[Fonte: Mekonnen and Hoekstra, PNAS, 28 February 2012].

Complessivamente, le differenze tra le impronte idriche delle varie nazioni sono funzione del diverso stile di vita e, in particolare, delle diverse abitudini alimentari; a titolo di esempio, negli Stati Uniti il consumo annuo pro capite di carne bovina, che rappresenta uno dei prodotti alimentari meno sostenibili dal punto di vista idrico con addirittura 15˙415 litri di acqua per produrne un solo chilogrammo, è pari a 43 chilogrammi, corrispondente a circa 4,5 volte la media globale: questo fa sì che la conseguente impronta idrica sia nettamente superiore rispetto al resto del Pianeta. L'impronta idrica più elevata a livello globale è quella di un cittadino statunitense ed è pari a circa $2˙840\,m^3$ annui pro capite di acqua: tale valore è nettamente superiore a quella del Giappone, pari a circa $1˙380\ m^3$. L’impronta idrica di Cina e India sono state invece calcolate rispettivamente in 1˙070 e 1˙089 m^3 annui pro capite: questi dati sono però in forte ascesa, come conseguenza diretta del notevole sviluppo economico che questi Paesi stanno registrando negli ultimi decenni. L’impronta idrica costituisce quindi un importante indicatore di come le scelte economiche e i processi produttivi possano determinare un notevole impatto sulla disponibilità delle risorse idriche.

Se le modalità con cui l’acqua dolce viene gestita a livello globale non cambieranno entro tempi brevi, la crisi idrica assumerà dimensioni enormi, con ripercussioni drammatiche per la stabilità politica, lo sviluppo economico e la pace di un numero di nazioni sempre crescente, in particolare gli Stati dell’Africa sahariana e subsahariana nonché quelli già interessati da questo problema, fino a superare le frontiere nazionali coinvolgendo Paesi che godono attualmente di una situazione politica stabile. Un ulteriore fattore che contribuisce a peggiorare ulteriormente la situazione è rappresentato dalla forte concorrenza che sussiste tra il settore energetico e gli altri utilizzi di questa risorsa, oggi già molto limitata: si può infatti osservare che, se nel 1950 erano state edificate solo 500 grandi dighe in tutto il mondo, allo stato attuale il loro numero ammonta ad oltre 45˙000. Se l’attuale andamento crescente relativamente all’utilizzo della risorsa idrica continuerà fino alla metà di questo secolo, quando si prevede che la popolazione terrestre sfiorerà i 10 miliardi di persone, e ipotizzando che il volume annuo di pioggia rimanga invariato, si prevede che per sopperire alle necessità agricole, industriali e domestiche sarà necessario sfruttare l’intera riserva delle acque dolci del pianeta.

Risulta quindi necessario cambiare radicalmente l’atteggiamento che l’uomo ha nei confronti dell’acqua e del modo con cui essa viene amministrata a livello mondiale, inclusi gli attuali programmi focalizzati alla riduzione della domanda idrica: tra i fattori che concorrono a migliorare la situazione attuale, la conservazione e il riutilizzo dell'acqua possono determinare un impatto fortemente positivo sull’abbattimento dei fabbisogni idrici. Per quanto concerne le misure economiche, è previsto a livello mondiale un investimento annuo di 11 miliardi di dollari allo scopo di garantire l'approvvigionamento idrico e la realizzazione di adeguate strutture igienico-sanitarie, mentre a livello politico è in atto la realizzazione di un meccanismo strategico internazionale per gestire nel modo più efficace possibile i flussi migratori dovuti alla crisi idrica, per i quali è previsto un notevole incremento. Gli esperti auspicano infine la nascita di una sorta di economia blu, ossia un nuovo modello economico tale da premiare una gestione innovativa e sostenibile della risorsa idrica.

1.8 Sfruttamento della risorsa idrica

I consumi annui della risorsa idrica pro capite sono triplicati negli ultimi 50 anni, con un incremento della domanda stimato in circa 64 miliardi di metri cubi all'anno: questi dati sono causati sia dalla notevole crescita demografica a livello globale che dalla progressiva evoluzione degli stili di vita e delle abitudini alimentari dell'umanità negli ultimi anni. Un sistema efficace per ridurre questi valori in forte ascesa è quello di assumere un ruolo attivo nella realizzazione del risparmio idrico, operando dei cambiamenti alle nostre consuetudini, in modo da determinare un minore impatto su una risorsa sempre più preziosa, quale è l'acqua dolce. Un maggiore risparmio idrico potrà in futuro avvenire solo ed esclusivamente se gli esseri umani diventeranno maggiormente consapevoli di quanto gravano, in termini di risorsa idrica impiegata, le nostre scelte e i nostri comportamenti.

Per ottenere una visione dettagliata di quanto i prelievi abbiano un'incidenza sempre maggiore sulla disponibilità della risorsa idrica mondiale è possibile fare riferimento al Water Exploitation Index (WEI, Indice di Sfruttamento dell'Acqua): tale indicatore esprime, con riferimento a un territorio nazionale, il rapporto tra la quantità di acqua estratta annualmente ed il totale delle risorse di acqua dolce disponibili a lungo termine, fornendo quindi una misura numerica dello stress a cui sono sottoposte le riserve idriche e del rischio di sovrasfruttamento della risorsa stessa. Il WEI può assumere teoricamente tutti i valori compresi tra 0% e 100% e viene calcolato come segue:

$$WEI = \frac{prelievo}{risorsa} \cdot 100 \quad [\%], \tag{1.2}$$

dove il numeratore del rapporto esprime i metri cubi di acqua prelevati annualmente da qualsiasi fonte di acqua dolce, comprendendo anche l'estrazione e/o il drenaggio delle venute d'acqua nelle miniere e negli scavi, la raccolta delle acque piovane e i prelievi per il raffreddamento degli impianti, con la sola eccezione dei prelievi eseguiti per garantire la produzione di energia idroelettrica; il denominatore indica invece la risorsa idrica rinnovabile annua media sul lungo periodo, a sua volta ottenuta per mezzo della formulazione sottostante:

$$RWR_{LTAA} = P_{LTAA} - Eta_{LTAA} + ExIn_{LTAA} \quad \left[\frac{m^3}{anno}\right], \tag{1.3}$$

- RWR_{LTAA} : Risorsa Idrica Rinnovabile;
- P_{LTAA} : Precipitazione che affluisce nel territorio in esame;
- Eta_{LTAA} : Volume di Evapotraspirazione Reale;
- $ExIn_{LTAA}$: External Inflow, ossia l'eventuale volume idrico proveniente dai territori limitrofi rispetto a quello preso in considerazione, sia superficialmente che attraverso flussi sotterranei.

Il pedice che compare in corrispondenza dei singoli addendi esprime infine il cosiddetto "Long Term Annual Average", ossia l'intervallo temporale in cui mediare i valori numerici dei vari termini, pari ad almeno 20 anni sulla base delle indicazioni fornite da Eurostat.

Il parametro WEI può ricadere in uno dei tre seguenti intervalli:

- $0\% \leq WEI \leq 20\%$: assenza di stress idrico delle riserve;
- $20\% \leq WEI \leq 40\%$: condizione di stress idrico;
- $WEI \geq 40\%$: stress idrico molto grave, con rischio di utilizzo insostenibile della risorsa.

Nella tabella sottostante sono riportati i valori numerici dei prelievi annui, della risorsa disponibile e del Water Exploitation Index relativi alle principali realtà geografiche extraeuropee:

Stato	***Prelievi idrici annui pro capite*** $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$	***Riserva idrica disponibile pro capite*** $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$	***Water Exploitation Index***
Arabia Saudita	705,42	72,86	968,18%
Australia	664,80	20˙123	3,30%
Brasile	308,01	41˙316	0,75%
Canada	991,76	79˙238	1,25%
Cina	425,13	1˙971	21,57%
Egitto	803,58	589,4	136,34%
Etiopia	101,83	1˙162	8,76%
Giordania	109,27	96,58	113,14%
Iraq	1˙052,96	2˙348	44,85%
Messico	702,00	3˙576	19,63%
Mozambico	54,47	3˙717	1,47%
USA	1˙384,64	9˙459	14,64%

Tabella 1.6: Indicatori WEI relativi ai Paesi extraeuropei
[Fonte: Aquastat, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013-2017].

La tabella precedente permette di osservare che il parametro Water Exploitation Index assume valori compresi in un range molto esteso: i risultati più confortanti, relativi cioè ad un utilizzo limitato della risorsa, si riscontrano in Brasile, Canada, Mozambico e Australia, ossia in quelle realtà territoriali caratterizzate principalmente da un'abbondanza delle riserve idriche; un discorso a parte è quello relativo al Mozambico, per il quale sono invece i prelievi idrici annui ad assumere valori molto contenuti, quale conseguenza di un tenore di vita estremamente basso. Il maggiore sfruttamento della risorsa idrica si riscontra invece in Arabia Saudita, Egitto, Giordania e Iraq; i primi tre Stati di questo elenco presentano valori superiori al 100%, ossia richiedono un volume d'acqua che eccede la risorsa idrica annuale: questo è dovuto al fatto che gran parte dei prelievi provengono dalla desalinizzazione delle acque marine o salmastre, che non sono incluse nel calcolo della risorsa idrica annua disponibile. L'ultima osservazione riguarda Cina e Messico, che presentano un indice di sfruttamento della risorsa idrica di circa il 20%, determinando quindi una condizione di incipiente stress idrico.

Per quanto riguarda invece i livelli di sfruttamento della risorsa idrica nel Vecchio Continente, occorre fare riferimento ai risultati elaborati e raccolti nella tabella seguente:

Stato	***Prelievi idrici annui pro capite*** $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$	***Riserva idrica disponibile pro capite*** $\left[\frac{m^3}{ab \cdot anno}\right]$	***Water Exploitation Index***
Belgio	541,8	1˙651	32,82%
Cipro	270,94	661	40,99%
Francia	454,17	3˙247	13,99%
Germania	312,05	1˙875	16,64%
Islanda	843,33	507˙463	0,17%
Italia	564,40	3˙223	17,51%
Malta	144,04	117,2	123,09%
Olanda	527,97	5˙342	9,88%
Polonia	278,50	1˙585	17,57%
Regno Unito	127,00	2˙221	5,72%
Romania	321,98	10˙773	2,99%
Serbia	531,62	18˙451	2,88%
Spagna	702,25	2˙405	29,20%

Tabella 1.7: Indicatori WEI relativi ai Paesi europei
[Fonte: Aquastat, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013-2017].

Sulla base dai valori precedentemente tabulati, si può percepire che il rischio di un sovrasfruttamento della risorsa idrica rappresenta un fenomeno diffuso non solo nel resto del mondo ma, al contrario, anche in alcune parti del continente europeo: in particolare, i valori più elevati si riscontrano nelle realtà insulari come Malta e Cipro e, in misura minore, nella maggioranza dei Paesi dell'area mediterranea. Inoltre, mentre negli anni precedenti era opinione comune ritenere che la scarsità della risorsa idrica riguardasse solo la parte meridionale dell'Europa, le rilevazioni più dettagliate eseguite negli ultimi dieci anni hanno invece evidenziato come il problema dello stress idrico stia coinvolgendo anche alcuni Paesi del Nord Europa: l'esempio più rilevante è rappresentato dal Belgio per il quale, nonostante i dati più aggiornati siano relativi solamente al quinquennio precedente (2008-2012), il Water Exploitation Index assume un valore di poco inferiore al 33%; il precedente dato è dovuto alla combinazione di prelievi idrici elevati e di una disponibilità della risorsa particolarmente contenuta, determinando pertanto delle criticità paragonabili solo a quelle di Spagna e Cipro.
L'ultima osservazione riguarda infine Malta che risulta essere caratterizzata, così come altri Stati extraeuropei, da un valore dell'indice WEI nettamente superiore al 100%: le motivazioni di questo dato apparentemente fuori scala possono essere ricondotte al fatto che oltre il 50% dei prelievi idrici totali provengono dalla captazione delle acque marine.

Un quadro complessivo dei livelli di sfruttamento della risorsa idrica nei singoli Paesi che compongono l'area geografica europea è fornito dal grafico sottostante, il quale rappresenta i valori assunti dal Water Exploitation Index, ottenuti sulla base delle elaborazioni statistiche eseguite dall'European Environmental Agency (EEA); l'indice WEI è stato suddiviso in tre classi, che permettono di comprendere come circa la metà degli Stati presi in esame sia sottoposta ad una condizione di stress idrico oppure di incipiente scarsità idrica.

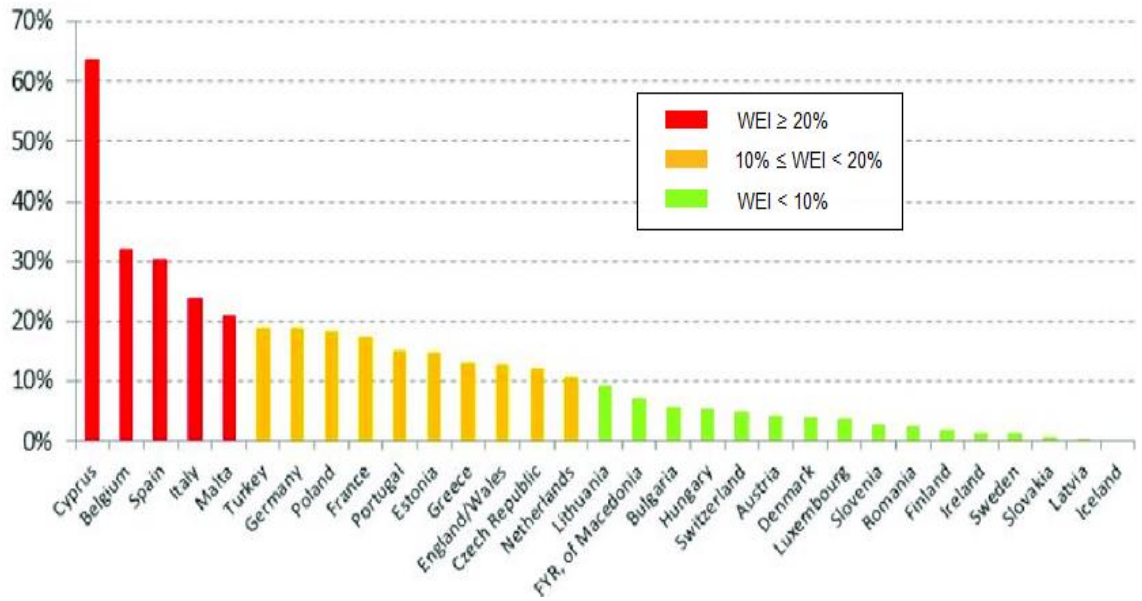

Figura 1.8: Valori del parametro WEI calcolati per 31 Stati europei [Fonte: European Environment Agency].

Alla luce delle precedenti osservazioni, occorre elaborare soluzioni immediate ed efficaci per garantire una migliore gestione della risorsa idrica: in particolare, con il presente elaborato si pone l’attenzione sulla gestione dell’acqua per usi domestici, in quanto l’utilizzo irriguo e quello industriale della risorsa idrica richiedono entrambi soluzioni complesse, tali cioè da coinvolgere le politiche economiche su grande scala, almeno a livello nazionale.
L’acqua utilizzata in ambito civile costituisce una frazione minore del consumo idrico totale, pari all'8% nel mondo, al 14% in Europa e al 20% in Italia: tali valori sono però in forte ascesa, soprattutto come diretta conseguenza del miglioramento degli stili di vita. Inoltre l’utilizzo idrico domestico richiede il prelievo delle acque di migliore qualità, caratteristica intrinseca delle sole acque di falda e di sorgente, ed è quindi tale da determinare i costi maggiori non solo per quanto riguarda l’approvvigionamento idrico, ma anche per la gestione delle infrastrutture e per i trattamenti delle acque captate. Sono considerati consumi idrici domestici unicamente quelli relativi alle utenze residenziali vere e proprie, che in Italia richiedono circa il 75% dei volumi idrici per uso civile; il rimanente 25% fa invece riferimento agli utilizzi non residenziali, come avviene ad esempio per uffici, scuole, alberghi e ristoranti, assimilabili tuttavia a quelli domestici, seppur con differenze notevoli in termini di volumi di acqua impiegati.

Il protrarsi di condizioni climatiche avverse e di periodi prolungati di siccità richiede un’attenzione sempre maggiore sulle modalità con cui la risorsa idrica viene impiegata dalle utenze domestiche, sia per gli utilizzi interni che per quelli esterni all’edificio: l’obiettivo del presente elaborato è quello di analizzare i principali modelli di bilancio idrico che sono stati elaborati nell’ultimo decennio, sia per un edificio residenziale che per eventuali sottosistemi. Il termine “bilancio idrico” indica quel processo di valutazione di tutte le componenti in ingresso ed in uscita da un sistema, allo scopo di determinare l'impiego finale della risorsa e di sviluppare quindi strategie di risparmio idrico tramite l’installazione di sistemi di approvvigionamento alternativo. I modelli più evoluti sono dotati anche di equazioni in grado di valutare la fattibilità tecnico-economica e il rendimento del sistema, determinando in questo modo la strategia più adatta ad ogni caso di studio.

2. Studio analitico del bilancio idrico a scala di edificio

L'obiettivo di questo e dei prossimi due capitoli è quello di eseguire una trattazione analitica del bilancio idrico a livello di edificio, sviluppando inoltre alcuni aspetti specifici quali l'analisi costi-benefici e il calcolo del rendimento del sistema.

All'intero di questo capitolo sarà analizzato il modello di bilancio idrico proposto nel 2013 da Agudelo-Vera, Keesman, Mels e Rijnaarts: questa soluzione risulta particolarmente elaborata, in quanto fa riferimento alla scala temporale oraria, contempla diverse scale spaziali e prende in considerazione non solo le acque meteoriche ma anche una componente aggiuntiva, rappresentata dal riutilizzo delle acque grigie, in base all'approccio Urban Harvesting Approach (UHA, Approccio di Raccolta delle acque a scala Urbana). Più dettagliatamente, lo schema considerato prevede la presenza di tre serbatoi disposti in serie per la raccolta delle acque grigie e di quelle meteoriche: il primo ha come compito lo stoccaggio delle acque reflue provenienti dalle docce, mentre il secondo e il terzo sono adibiti rispettivamente al trattamento delle stesse e alla raccolta delle acque grigie depurate e delle acque meteoriche provenienti dalla copertura dell'edificio. Il modello sopra definito si prefigge un duplice scopo, ossia la riduzione dei volumi idrici prelevati dalla rete acquedottistica pubblica e il contenimento del volume di acque grigie defluenti nella rete fognaria, definendo al contempo tutte le componenti del bilancio idrico necessarie per realizzare questi due obiettivi.

Il capitolo 3 sarà invece dedicato completamente al modello di bilancio idrico elaborato da Norman Pelak e Amilcare Porporato nel 2016: questa analisi esegue il bilancio idrico a scala giornaliera di un sottosistema dell'edificio, considerando il contributo delle acque meteoriche tramite l'installazione di un sistema RWH (RainWater Harvesting), detto anche DRWH (Domestic RainWater Harvesting), ossia un impianto per garantire la raccolta e il successivo utilizzo delle acque piovane. Inizialmente saranno analizzate le equazioni fondamentali che compongono lo studio e successivamente si introdurranno alcuni parametri adimensionali in modo da ridurre il numero delle variabili e fornire quindi una visione più completa dell'argomento: l'utilizzo delle grandezze adimensionali consente infatti di determinare il rapporto che intercorre tra i vari termini che definiscono il bilancio idrico, garantendo pertanto l'ottimizzazione tecnico-economica del sistema RWH che verrà installato.

Nel capitolo 4 si darà invece ampio spazio al modello introdotto da Tsihrintzis e Baltas tra il 2013 e il 2014 e perfezionato successivamente da Londra et al. tra il 2015 e il 2017: così come il precedente, anche questo modello considera il bilancio idrico a scala giornaliera di un sottosistema dell'edificio, ossia una cisterna per la raccolta delle acque piovane. Esso presenta un duplice obiettivo, vale a dire la valutazione dell'affidabilità del sistema e la successiva analisi costi-benefici; al tempo stesso, emergono notevoli differenze rispetto al precedente modello, sia nel calcolo dei volumi in ingresso e in uscita dal serbatoio che per quanto riguarda la duplice modalità di determinazione dei risultati.

2.1 Modello di bilancio idrico proposto da Agudelo-Vera et al. (2013)

Il presente modello si propone di valutare il bilancio idrico annuale, con scala temporale oraria, di un edificio dotato di un sistema misto di raccolta delle acque piovane e di trattamento e successivo riutilizzo delle acque grigie; l'approccio a cui si fa riferimento è detto UHA (Urban Harvesting Approach), il quale propone metodi per migliorare la gestione delle risorse idriche urbane.
L'UHA si prefigge il raggiungimento dei seguenti tre obiettivi:

- minimizzazione dei volumi idrici richiesti alla rete acquedottistica, tramite l'implementazione di una tecnologia più moderna ed efficiente;
- "multi-sourcing", detto anche "multiple sourcing", ossia il soddisfacimento della domanda idrica, non garantita dal riciclaggio delle acque grigie, tramite appositi sistemi RWH: il precedente termine è l'abbreviazione di RainWater Harvesting ed esprime lo stoccaggio delle acque meteoriche, defluenti sulla copertura, per soddisfare parte della domanda idrica dell'utenza;
- minimizzazione dei volumi idrici in uscita, attraverso l'incremento della qualità delle acque grigie per il loro successivo utilizzo.

Sulla base dei risultati preliminari conseguiti per due abitazioni di riferimento situate rispettivamente nei Paesi Bassi e in Australia, la strategia UHA ha dimostrato la propria efficacia relativamente al raggiungimento dell'autosufficienza idrica; i valori ottenuti negli studi precedenti sono però relativi solo ad un caso ideale, in quanto sono stati ricavati prendendo in esame solo un'abitazione media e supponendo di poter sfruttare tutte le risorse idriche locali a disposizione dell'utenza. Le casistiche reali presentano invece delle limitazioni per quanto riguarda la raccolta di tali risorse; tali limiti fanno riferimento ai seguenti tre aspetti:

- variazioni della tipologia di edificio oggetto di studio, come ad esempio case indipendenti oppure condomini;
- variazioni spaziali e stagionali, associate ai modelli annuali di precipitazione;
- variazioni temporali relative ai modelli di domanda e approvvigionamento idrico presi in esame, che presentano fluttuazioni su scala giornaliera, settimanale, stagionale e annuale.

Il modello in esame applica la strategia UHA a due diverse tipologie di edifici nei Paesi Bassi: una casa monofamiliare indipendente con 4 residenti (cioè una famiglia con due figli) e un complesso residenziale di medie dimensioni composto da 28 appartamenti con 2 residenti per ogni appartamento (ossia una coppia senza figli). In entrambi i casi, si fa riferimento ad un consumo idrico giornaliero pro capite coerente con quello ricavato da un'indagine condotta nel 2010, che ha stimato un valore medio della domanda pari a 124 litri al giorno per ogni utente. Il numero di utenti e la quantità di

apparecchi idrici installati costituiscono parametri fondamentali per definire le variazioni dei consumi idrici giornalieri, così come la tipologia dell'edificio preso in esame: si assume infatti che gli appartamenti siano privi di vasche da bagno e che la casa monofamiliare possieda invece due bagni.

Nella figura sottostante è riportato lo schema completo del sistema di gestione idrica preso come riferimento per le due tipologie di edificio oggetto dell'analisi.

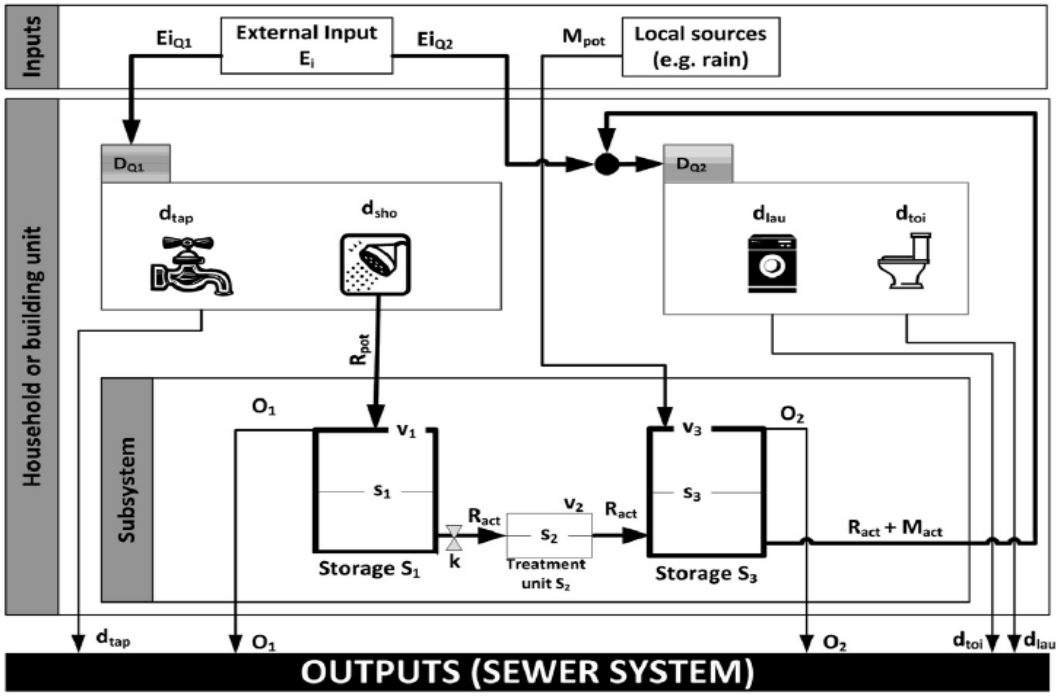

Figura 2.1: Schema del sistema idrico impiegato per realizzare l'approccio UHA [Fonte: Agudelo-Vera, Keesman, Mels, Rijnaarts, 2013].

Nella tabella seguente sono invece descritti i principali parametri delle due unità abitative in esame:

Parametro	*Casa monofamiliare*	*Condominio di medie dimensioni*
Area del tetto	$60\,m^2$	$640\,m^2$
Residenti	4 *persone*	56 *persone*
Numero di bagni	2	28
Numero di lavatrici	1	28
Numero di vasche da bagno	1	0
Numero di docce	1	28

Tabella 2.1: Descrizione dei parametri delle unità abitative prese in esame [Fonte: Agudelo-Vera, Keesman, Mels, Rijnaarts, 2013].

2.1.1 Equazioni del modello matematico

L'obiettivo dello studio è quello di descrivere analiticamente il bilancio idrico che interessa l'edificio in esame, analizzando singolarmente le varie componenti e ottimizzando poi il rendimento complessivo, tramite un utilizzo corretto delle risorse idriche disponibili e la minimizzazione dei volumi defluenti verso la rete fognaria. Per valutare la domanda idrica si è fatto ricorso al modello stocastico SIMDEUM (SIMulation of water Demand and End-Use Model), software sviluppato in Olanda dal Watercycle Research Institute: questo modello è in grado di simulare il bilancio idrico annuale considerando la domanda convenzionale oppure quella ridotta, relativa cioè all'installazione di dispositivi di risparmio idrico, e facendo riferimento alla scala temporale oraria. Lo studio focalizza la propria attenzione sui consumi idrici interni all'edificio, trascurando quindi le variazioni stagionali della domanda legate agli eventuali consumi esterni per l'irrigazione del giardino o dell'orto.

Siccome il consumo e la produzione delle acque grigie, e analogamente la raccolta delle acque piovane, costituiscono quantitativi diversi nonché differiti nel tempo, è necessario introdurre un sistema di stoccaggio in modo da connettere l'approvvigionamento e la domanda idrica; inoltre, per garantire il raggiungimento degli standard qualitativi previsti, è richiesto l'utilizzo di un'unita di trattamento per la depurazione delle acque di scarico. In questo studio vengono presi in esame tre serbatoi:

- serbatoio S_1, avente volume v_1, per la raccolta delle acque grigie non trattate;
- serbatoio S_2, per effettuare il trattamento delle acque grigie; il volume di questa unità di depurazione è definito dalla formula (2.1):

$$v_2 = RT \cdot k\,, \tag{2.1}$$

  dove RT rappresenta il tempo di permanenza idraulica (HRT, Hydraulic Residence Time) $[h]$, mentre k è la capacità di trattamento oraria delle acque grigie $\left[l \cdot h^{-1}\right]$;

- serbatoio S_3, con volume v_3, in cui vengono convogliate sia le acque grigie provenienti dal serbatoio S_2 che l'acqua piovana raccolta dal sistema RWH.

Vengono poi adottate le seguenti assunzioni semplificative:

- i tre serbatoi in esame sono interrati e quindi chiusi: questo implica che l'evapotraspirazione possa essere idealmente esclusa dal modello;
- il volume iniziale dell'acqua stoccata nei tre serbatoi è assunto pari a zero.

Per realizzare l'approccio UHA, si considera che le acque grigie provenienti dalle docce e dalle vasche da bagno (d_{sho}) siano raccolte nel serbatoio S_1, trattate poi in S_2 e nuovamente stoccate nella cisterna S_3 per poter rifornire le vaschette dei WC (d_{toi}) e le lavatrici (d_{lau}); occorre poi ricordare che in questo modello l'acqua che scorre dai rubinetti oppure impiegata dalle lavastoviglie (d_{tap}) non costituisce un volume soggetto a stoccaggio e successivo utilizzo, ma defluisce direttamente all'interno della rete fognaria.

Bilancio idrico a scala di edificio

L'espressione generale del bilancio di massa a scala di edificio è la seguente:

$$\frac{dS}{dt} = T_i - T_o - C_o \,. \tag{2.2}$$

Sotto l'ipotesi che l'acqua sia un liquido incomprimibile, la densità $\rho\left[kg \cdot m^{-3}\right]$ della stessa può essere omessa in quanto costante, trasformando quindi il bilancio di massa in un bilancio di volumi.

Nella formula (2.2) S esprime il volume stoccato $\left[m^3\right]$, mentre le portate entranti (T_i), le portate uscenti (T_o) e le perdite idriche (C_o) sono calcolate rispettivamente con le equazioni (2.3), (2.4) e (2.5):

$$T_i = Ei_{Q1} + Ei_{Q2} + M_{pot} \qquad \left[\frac{m^3}{h}\right], \tag{2.3}$$

con:

- Ei_{Q1}: portata oraria dalla rete pubblica per soddisfare la domanda di acqua potabile D_{Q1};
- Ei_{Q2}: portata oraria dalla rete pubblica per soddisfare la domanda di acqua non potabile D_{Q2};
- M_{pot}: portata oraria di acqua piovana potenzialmente stoccabile nel serbatoio;

$$T_o = d_{tap} + d_{lau} + d_{toi} + O_1 + O_2 \qquad \left[\frac{m^3}{h}\right], \tag{2.4}$$

con:

- d_{tap}: domanda idrica domestica per i rubinetti e per la lavastoviglie;
- d_{lau}: domanda idrica domestica per la lavatrice;

- d_{toi}: domanda idrica domestica per il WC;
- O_1: portata oraria di acqua sfiorata dal serbatoio S_1, convogliata nella rete fognaria;
- O_2: portata oraria di acqua sfiorata dal serbatoio S_3, convogliata nella rete fognaria;

$$C_o = 0 \text{: assenza di perdite idriche.} \qquad (2.5)$$

Noti i vari termini in ingresso e in uscita dall'edificio, è possibile esprimere l'equazione del bilancio idrico orario a scala di edificio tramite la seguente relazione, che definisce la variazione per unità di tempo del volume S di acqua stoccata all'interno del sistema:

$$\frac{dS}{dt} = \left[Ei_{Q1}(t) + Ei_{Q2}(t) + M_{pot}(t)\right] - \left[d_{tap}(t) + d_{lau}(t) + d_{toi}(t) + O_1(t) + O_2(t)\right]. \qquad (2.6)$$

Il sistema in questione è costituito dall'intero edificio e permette quindi di definire il volume idrico come la somma dell'acqua stoccata nei tre serbatoi in serie, nonché quella contenuta nelle diverse tubazioni dell'edificio e nelle vaschette dei WC. L'espressione (2.6) costituisce l'equazione di continuità su cui si fonda il modello ed esprime il concetto che la variazione nel tempo del volume di acqua immagazzinata è pari alla differenza tra le portate in ingresso e le portate in uscita dall'edificio nello stesso intervallo di tempo.

L'equazione (2.6) può essere visualizzata attraverso il seguente schema, che costituisce il riferimento grafico per la valutazione del bilancio idrico di un edificio:

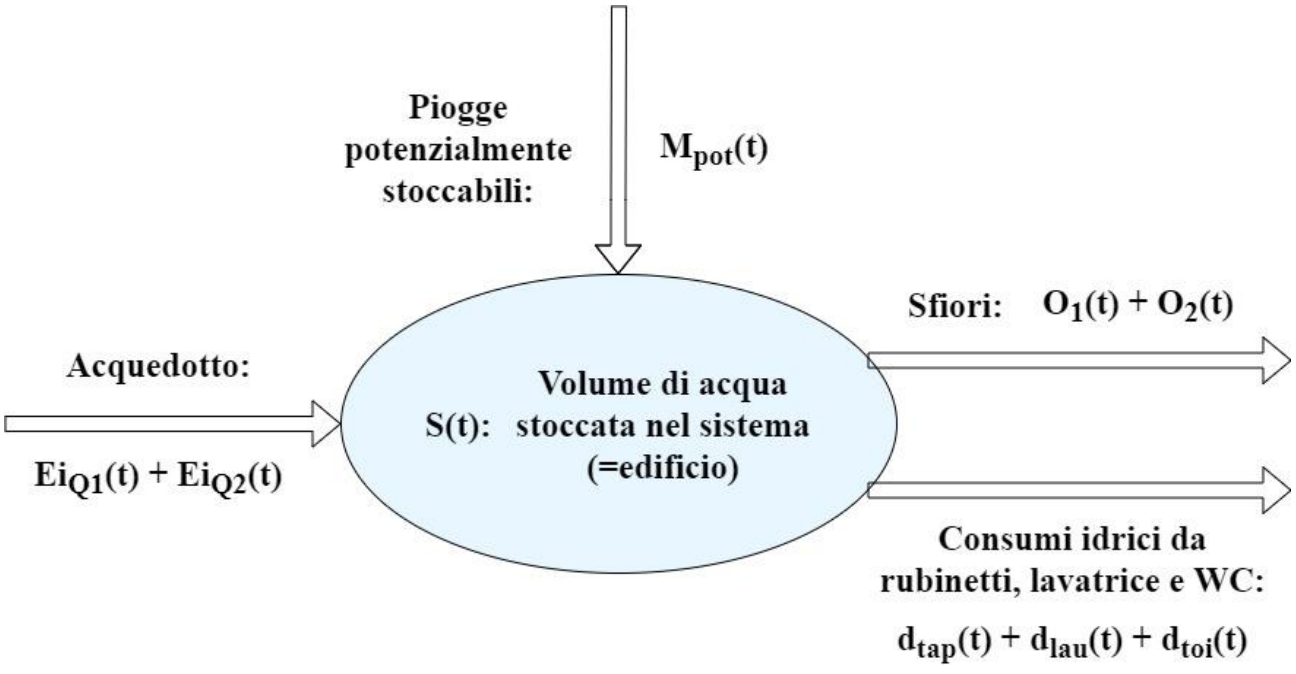

Figura 2.2: Schema del bilancio idrico a scala di edificio.

I vari termini che compaiono nella precedente equazione vengono modellati come segue:

- ✓ $Ei_{Q1}(t)$ è la portata oraria prelevata dalla rete acquedottistica per soddisfare la domanda di acqua potabile $D_{Q1}(t)$ ed è ottenuta sommando la domanda idrica per l'utilizzo delle docce e delle vasche da bagno alla domanda per l'utilizzo dei rubinetti:

$$Ei_{Q1}(t) = d_{sho}(t) + d_{tap}(t); \tag{2.7}$$

- ✓ la portata oraria $Ei_{Q2}(t)$, prelevata dalla rete pubblica per soddisfare la richiesta di acqua non potabile $D_{Q2}(t)$, viene invece valutata con la seguente equazione:

$$Ei_{Q2}(t) = D_{Q2}(t) - R_{act}(t) - M_{act}(t), \tag{2.8}$$

dove i tre addendi sono a loro volta modellati in base alle formule di seguito riportate:

- $D_{Q2}(t)$ esprime la domanda oraria di acqua non potabile che può essere impiegata sia per le lavatrici che per i WC, in base a quanto espresso dalla relazione (2.9):

$$D_{Q2}(t) = d_{lau}(t) + d_{toi}(t); \tag{2.9}$$

- $R_{act}(t)$, cioè la portata oraria di acque grigie che verranno effettivamente riciclate, è una costante ricavata sottraendo alla portata oraria di acque grigie potenzialmente riciclabili $(R_{pot}(t))$ i possibili sfiori $(O_1(t))$ dalla prima cisterna, come indicato nell'espressione (2.10):

$$R_{act}(t) = R_{pot}(t) - O_1(t), \tag{2.10}$$

dove il riciclaggio potenziale $(R_{pot}(t))$, sulla base dell'equazione (2.11), coincide numericamente con la domanda idrica oraria per le docce e le vasche da bagno, mentre la portata oraria $(O_1(t))$ sfiorata dal primo serbatoio di raccolta delle acque grigie non trattate è calcolata sulla base dell'equazione (2.12):

$$R_{pot}(t) = d_{sho}(t), \tag{2.11}$$

$$\int_o^t O_1(t)dt = s_1(t) - v_1, \tag{2.12}$$

con $s_1(t)$ e v_1 che esprimono rispettivamente il volume di acqua potenzialmente stoccabile, su scala temporale oraria, nel serbatoio S_1 e la capacità del medesimo, che viene impostata

sulla base della produzione giornaliera media di acque grigie.

Complessivamente, i termini che compaiono nelle tre equazioni (2.10), (2.11) e (2.12) definiscono la seguente equazione del bilancio idrico orario per il primo serbatoio:

$$\frac{ds_1(t)}{dt} = R_{pot}(t) - R_{act}(t) - O_1(t). \tag{2.13}$$

La formula precedente esprime la variazione oraria del volume $s_1(t)$ di acqua immagazzinata nella prima cisterna: se tale valore è positivo allora il serbatoio S_1 si sta riempiendo, mentre se è negativo esso si sta invece svuotando; il livello idrico rimarrà infine immutato nel caso in cui $\frac{ds_1(t)}{dt} = 0$;

- $M_{act}(t)$ definisce la portata oraria di acqua piovana effettivamente impiegata dall'utenza ed è ricavato sottraendo alle acque piovane potenzialmente stoccabili $(M_{pot}(t))$ gli sfiori $(O_2(t))$ dal terzo serbatoio, come indicato dall'espressione (2.14):

$$M_{act}(t) = M_{pot}(t) - O_2(t), \tag{2.14}$$

dove la portata oraria di acqua piovana potenzialmente utilizzabile $(M_{pot}(t))$, captata dalla superficie della copertura secondo l'approccio multi-sourcing, può essere stimata per mezzo dell'espressione (2.15):

$$M_{pot}(t) = P(t) \cdot A \cdot RC, \tag{2.15}$$

nella quale $A\,[m^2]$ esprime l'area della proiezione orizzontale della copertura, $RC\,[-]$ il coefficiente di deflusso e $P(t)\,[m \cdot h^{-1}]$ l'intensità oraria di pioggia, ricavata dai dati forniti dalla stazione meteorologica della città di Wageningen, che è la più vicina all'area di studio; la portata oraria $O_2(t)$ di acqua sfiorata dal terzo serbatoio, per la raccolta delle acque grigie trattate e di quelle meteoriche captate dal tetto, è invece calcolata con l'equazione (2.16):

$$\int_o^t O_2(t)dt = s_3(t) - v_3, \tag{2.16}$$

con $s_3(t)$ e v_3 che esprimono rispettivamente il volume di acqua potenzialmente stoccabile, su scala temporale oraria, nel serbatoio S_3 e la capacità del medesimo.

Complessivamente, l'equazione del bilancio idrico orario del terzo serbatoio è la seguente:

$$\frac{ds_3(t)}{dt} = R_{act}(t-RT) + M_{pot}(t) - R_{act}(t-RT) - M_{act}(t) - O_2(t), \qquad (2.17)$$

dove il termine $R_{act}(t-RT)$ indica la portata oraria di acque grigie riciclate dopo essere permaste all'interno del serbatoio S_2 per un intervallo temporale pari al tempo di ritenzione idraulica RT ; analogamente a quanto visto per il primo serbatoio, se la precedente derivata fornisce un risultato positivo allora la cisterna S_3 si riempie, mentre al contrario si svuota; il livello idrico del serbatoio resterà infine immutato nel caso in cui si verifichi la condizione $\frac{ds_3(t)}{dt} = 0$;

- ✓ i tre termini $d_{tap}(t)$, $d_{lau}(t)$ e $d_{toi}(t)$ indicano rispettivamente la domanda idrica domestica per i rubinetti delle cucine e dei bagni e per le lavastoviglie, nonché per le lavatrici e i WC: essi sono valutati in termini di portate orarie, a partire dai valori giornalieri dei consumi convenzionali oppure di quelli minimizzati;

- ✓ $O_1(t)$ e $O_2(t)$ fanno infine riferimento alle portate orarie sfiorate dai serbatoi S_1 e S_3; essi sono calcolati rispettivamente sulla base delle espressioni (2.12) e (2.16), introdotte in precedenza:

$$\int_o^t O_1(t)dt = s_1(t) - v_1, \qquad (2.12)$$

$$\int_o^t O_2(t)dt = s_3(t) - v_3. \qquad (2.16)$$

Bilancio idrico a scala di sottosistema

Per quanto riguarda invece il volume di controllo del sottosistema, costituito dai tre serbatoi in serie per la raccolta e il riciclaggio delle acque, si può definire il seguente bilancio idrico, valutato facendo sempre riferimento alla scala temporale oraria:

$$\frac{ds(t)}{dt} = R_{pot}(t) + M_{pot}(t) - O_1(t) - O_2(t) - R_{act}(t - RT) - M_{act}(t), \qquad (2.18)$$

dove $s(t)$ esprime il volume di acqua immagazzinata nell'intero sottosistema, ossia nel complesso delle tre cisterne per la raccolta e il trattamento delle acque (S_1, S_2, S_3):

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) + s_3(t); \qquad (2.19)$$

le portate orarie in ingresso e in uscita dal sottosistema, ossia i termini che compaiono a secondo membro dell'equazione (2.18), sono invece modellate sulla base delle equazioni precedentemente introdotte per l'analisi dell'intero sistema.

La formula (2.18) per il bilancio idrico del sottosistema può essere raffigurata nello schema seguente:

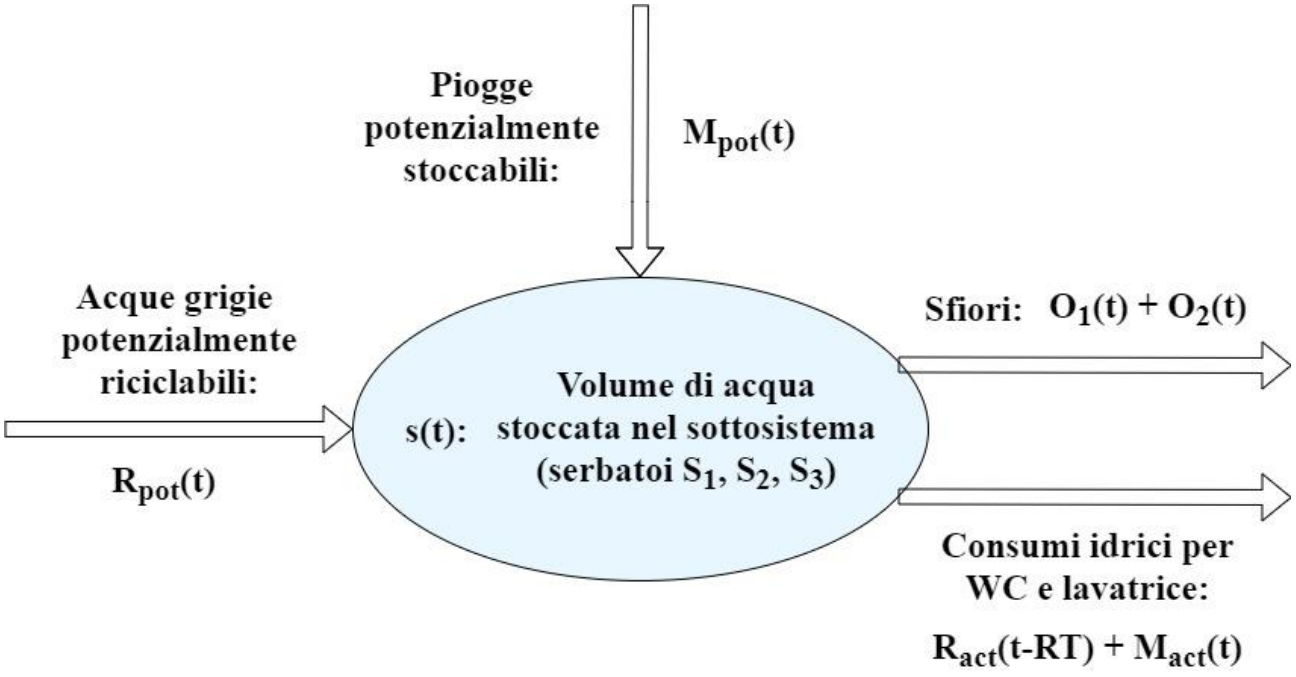

Figura 2.3: Schema del bilancio idrico a scala di sottosistema.

Bilancio idrico a scala di singolo serbatoio

E' possibile infine considerare il livello di dettaglio massimo, valutando singolarmente le tre cisterne che compongono il sottosistema; a tale scopo, il bilancio di massa del serbatoio S_1 per lo stoccaggio delle acque grigie da trattare e del serbatoio S_3 di raccolta delle acque grigie riciclate e delle acque piovane è definito dalle equazioni (2.13) e (2.17), introdotte in precedenza per definire il bilancio idrico dell'intero edificio:

$$\frac{ds_1(t)}{dt} = R_{pot}(t) - R_{act}(t) - O_1(t), \tag{2.13}$$

$$\frac{ds_3(t)}{dt} = R_{act}(t-RT) + M_{pot}(t) - R_{act}(t-RT) - M_{act}(t) - O_2(t). \tag{2.17}$$

Le due espressioni precedenti vengono combinate rispettivamente con le equazioni (2.12) e (2.16), in modo da definire le eventuali portate orarie sfiorate dalle relative cisterne S_1 ed S_3:

$$\int_o^t O_1(t)dt = s_1(t) - v_1, \tag{2.12}$$

$$\int_o^t O_2(t)dt = s_3(t) - v_3. \tag{2.16}$$

E' quindi sufficiente definire la seguente equazione, relativa alla variazione del volume $s_2(t)$ di acqua stoccata nella seconda cisterna (S_2) per il trattamento delle acque grigie:

$$\frac{ds_2(t)}{dt} = R_{act}(t) - R_{act}(t-RT), \tag{2.20}$$

dove il termine $R_{act}(t-RT)$ è pari a zero quando $t \le RT$, ossia per tempi di permanenza inferiori al tempo di ritenzione idraulica, in quanto il riciclaggio delle acque grigie non è ancora completo.

In maniera del tutto analoga a quanto visto precedentemente per le cisterne S_1 ed S_3, anche per quanto riguarda il serbatoio S_2 di riciclaggio delle acque reflue vale una delle tre seguenti condizioni:

- se $\frac{ds_2(t)}{dt} > 0$, il livello idrico nel serbatoio S_2 cresce;
- se $\frac{ds_2(t)}{dt} < 0$, il livello idrico si abbassa;
- se infine $\frac{ds_2(t)}{dt} = 0$, il livello idrico rimane inalterato.

Le figure sottostanti schematizzano i bilanci idrici di ognuno dei tre serbatoi che compongono il sottosistema oggetto di studio, con le relative portate orarie in ingresso e in uscita:

Figura 2.4: Schema del bilancio idrico del primo serbatoio di raccolta delle acque grigie.

Figura 2.5: Schema del bilancio idrico del secondo serbatoio per il riciclaggio delle acque grigie.

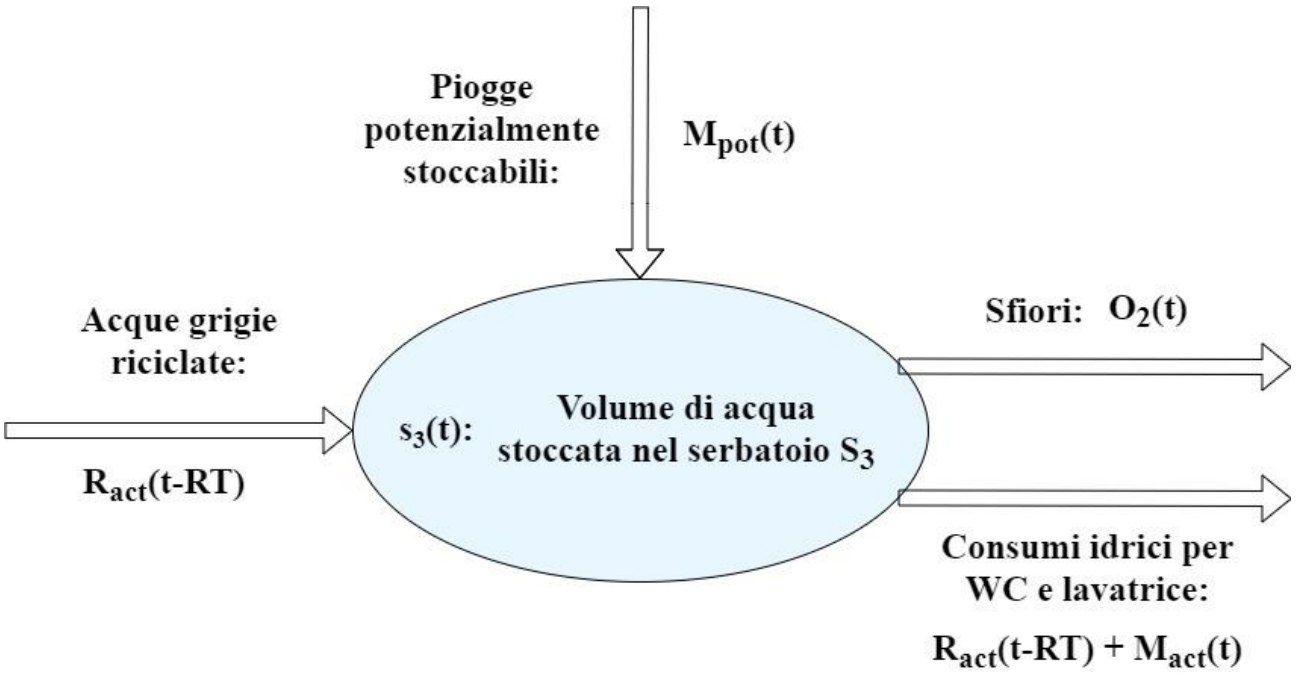

Figura 2.6: Schema del bilancio idrico del terzo serbatoio per soddisfare la domanda idrica.

2.1.2 Obiettivi dell'approccio UHA

Dopo aver definito i volumi di controllo del sistema e dei vari sottosistemi che lo compongono e aver modellato le relative portate in ingresso e in uscita, è possibile focalizzare l'attenzione sui primi due obiettivi fissati dall'approccio UHA, che prevedono il totale soddisfacimento della domanda idrica; si introduce pertanto la seguente formula, definita in termini di portate orarie $\left[m^3 \cdot h^{-1}\right]$, la quale funge da punto di partenza per elaborare le diverse strategie di risparmio idrico:

$$D(t) = D_{Q1}(t) + D_{Q2}(t) = Ei_{Q1}(t) + Ei_{Q2}(t) + R_{act}(t) + M_{act}(t). \quad (2.21)$$

La precedente equazione ripartisce la domanda idrica totale $D(t)$ nella somma di due contributi:

- domanda di acqua potabile $D_{Q1}(t)$, richiesta per i rubinetti della cucina e del bagno e per le lavastoviglie, nonché per le docce e le vasche, come riportato nella formula (2.22):

$$D_{Q1}(t) = d_{tap}(t) + d_{sho}(t); \quad (2.22)$$

- domanda di acqua non potabile $D_{Q2}(t)$, impiegata invece sia per i WC che per le lavatrici, come già precedentemente indicato nella relazione (2.9).

La domanda di acqua potabile $D_{Q1}(t)$ viene soddisfatta completamente solo dalla rete municipale, in quanto essa costituisce l'unico approvvigionamento di acqua potabile esistente; vale pertanto l'uguaglianza:

$$D_{Q1}(t) = d_{tap}(t) + d_{sho}(t) = Ei_{Q1}(t); \quad (2.23)$$

questa domanda può essere minimizzata tramite l'installazione di apposite tecnologie di risparmio idrico, quali rubinetti elettronici o termostatici, che costituiscono il primo passaggio per realizzare l'implementazione dell'approccio UHA.

La domanda di acqua non potabile $D_{Q2}(t)$ è invece garantita dalla rete acquedottistica $Ei_{Q2}(t)$, dal riciclaggio delle acque grigie $R_{act}(t)$ e dalla raccolta delle acque piovane $M_{act}(t)$, in base alla seguente formula:

$$D_{Q2}(t) = Ei_{Q2}(t) + R_{act}(t) + M_{act}(t). \quad (2.24)$$

Invertendo i termini della precedente equazione, si ricava l'espressione della portata oraria garantita dalla rete pubblica per soddisfare la domanda di acqua non potabile:

$$Ei_{Q2}(t) = D_{Q2}(t) - R_{act}(t) - M_{act}(t), \tag{2.25}$$

che può essere minimizzata lavorando su uno o più dei tre addendi a secondo membro, ossia:

- minimizzando la domanda di acqua non potabile $D_{Q2}(t)$, tramite l'implementazione di nuove tecnologie di risparmio idrico;
- massimizzando $R_{act}(t)$, cioè il riciclaggio delle acque grigie provenienti dall'uso delle docce;
- massimizzando $M_{act}(t)$, cioè le acque meteoriche raccolte dalla superficie di copertura.

L'autosufficienza relativa alla domanda di acqua non potabile $D_{Q2}(t)$ può essere conseguita, anche se solo teoricamente, se è soddisfatta la seguente condizione:

$$EI_{Q2}(t) = 0, \tag{2.26}$$

ossia in assenza dei prelievi idrici dalla rete pubblica per garantire la domanda di acqua non potabile; la precedente uguaglianza si traduce nell'equazione sottostante:

$$D_{Q2}(t) = R_{act}(t) + M_{act}(t), \tag{2.27}$$

la quale indica che la domanda di acqua non potabile è garantita esclusivamente dal riciclaggio delle acque grigie e dalla contemporanea raccolta delle acque meteoriche. Questa condizione definisce un caso solo ideale, in quanto si renderà prima o poi necessario il prelievo dalla rete acquedottistica: ciò si verifica, ad esempio, quando il regime pluviometrico della zona in cui è stata installata la cisterna è limitato o nel caso di estensione della copertura insufficiente a garantire il volume idrico richiesto.

Il terzo obiettivo dell'approccio UHA consiste nella minimizzazione delle acque grigie defluenti verso la rete fognaria ($We(t)$, waste export); questo termine può essere calcolato come segue:

$$We(t) = d_{tap}(t) + d_{lau}(t) + d_{toi}(t) + O_1(t) + O_2(t), \tag{2.28}$$

cioè come somma della domanda idrica per il funzionamento dei rubinetti, delle lavatrici e dei WC, nonché degli sfiori dal serbatoio S_1 di raccolta delle acque grigie da trattare e dal serbatoio S_3 di stoccaggio delle acque grigie trattate e di quelle meteoriche.

Per definire le modalità di riduzione dei deflussi nella rete fognaria, occorre riscrivere i termini che compaiono nell'espressione (2.28) sulla base delle equazioni precedentemente definite per la valutazione del bilancio idrico a scala di edificio; in particolare, si ricorre alle tre seguenti formule:

$$D(t) = D_{Q1}(t) + D_{Q2}(t) = d_{tap}(t) + d_{lau}(t) + d_{toi}(t) + d_{sho}(t), \quad (2.29)$$

$$R_{act}(t) = R_{pot}(t) - O_1(t), \quad (2.10)$$

$$R_{pot}(t) = d_{sho}(t), \quad (2.11)$$

dove l'equazione (2.10) esprime il concetto che la portata oraria di acque grigie, che saranno effettivamente trattate e in seguito stoccate nel serbatoio S_3, è inferiore al massimo valore teorico tutte le volte in cui il serbatoio S_1 è completamente pieno, con conseguente sfioro.

Sostituendo le tre precedenti formule nell'equazione (2.28), si ricava l'espressione definitiva delle acque defluenti nella rete fognaria $(We(t))$:

$$We(t) = D(t) - R_{act}(t) + O_2(t). \quad (2.30)$$

Per conseguire la minimizzazione della portata oraria $We(t)$ si può agire, sulla base dell'equazione (2.30), modificando i tre addendi contenuti a secondo membro della precedente equazione:

- riducendo $D(t)$, ossia la domanda idrica complessiva richiesta dall'utenza;
- aumentando $R_{act}(t)$, cioè le acque grigie effettivamente riciclate;
- riducendo $O_1(t)$ e $O_2(t)$, ossia gli sfiori dai serbatoi S_1 ed S_3; occorre infatti considerare che il termine $O_1(t)$, pur non comparendo esplicitamente nell'equazione (2.30), è riportato nell'espressione (2.10) che definisce le acque grigie da trattare.

La determinazione della capacità di stoccaggio ottimale, ossia i volumi v_1, v_2 e v_3 dei tre serbatoi S_1, S_2 ed S_3 definiti nel paragrafo 2.1.1 e impiegati rispettivamente per:

- S_1 : raccolta delle acque grigie provenienti dalle docce,
- S_2 : riciclaggio delle acque grigie,
- S_3 : stoccaggio delle acque grigie precedentemente depurate e delle acque meteoriche,

comporta però dei compromessi, in quanto è funzione degli spazi disponibili e, dal punto di vista economico, dei costi di installazione. E' tuttavia possibile utilizzare anche le risorse in eccesso: gli sfiori $O_1(t)$ e $O_2(t)$ possono essere ad esempio esportati dal sistema in esame e reimpiegati, nel caso di richiesta di acqua da parte di un'altra utenza; poiché però il modello si focalizza completamente sul bilancio idrico a scala di edificio, non è stata presa in considerazione questa esportazione di risorse, situazione che può invece essere valutata per scale spaziali più ampie, come ad esempio quelle di isolato, di quartiere o di città.

2.1.3 Indici di profilo metabolico

Il termine "profilo metabolico" è impiegato per indicare un confronto diretto tra diversi approcci, allo scopo di determinare la soluzione migliore relativamente alla minimizzazione dei consumi e dei volumi idrici defluenti nella fognatura; l'approccio di base si fonda sui seguenti parametri:

- $D(t)\ \left[m^3 \cdot h^{-1}\right]$: domanda idrica domestica;
- $We(t)\ \left[m^3 \cdot h^{-1}\right]$: portata oraria di acque grigie defluenti verso la fognatura;
- $Rh(t)\left[m^3 \cdot y^{-1}\right]$: risorsa idrica annua immagazzinata che, come verrà osservato nel paragrafo 2.1.4, può essere espressa in funzione del volume del sottosistema $\left(v_{ss} = v_1 + v_2 + v_3\right)$, ottenendo delle curve la cui pendenza definisce il beneficio, in termini economici, proveniente dall'installazione dei serbatoi per la raccolta delle acque piovane e il riciclaggio di quelle grigie. Più in generale, Rh rappresenta la risorsa idrica risparmiata annualmente tramite l'implementazione combinata delle due seguenti strategie di approvvigionamento idrico alternativo:

  - "multi-sourcing" o "multiple sourcing", che attua la raccolta delle acque meteoriche;
  - riciclaggio delle acque grigie provenienti dalle docce.

In base all'approccio UHA, il profilo metabolico è valutato analiticamente da tre indici adimensionali:

- $$DMI = \frac{Domanda\ convenzionale\left(D_{con}\right) - Domanda\left(D\right)}{Domanda\ convenzionale\left(D_{con}\right)} = \frac{\sum_{t=1}^{t=n}\left[D_{con}(t) - D(t)\right]}{\sum_{t=1}^{t=n} D_{con}(t)}: \qquad (2.31)$$

la formula precedente definisce il cosiddetto "Indice di Minimizzazione della Domanda" (DMI, Demand Minimization Index), che può teoricamente assumere tutti i valori compresi nell'intervallo chiuso e limitato $\left[0;1\right]$ ed esprime il rendimento del sistema nel ridurre la domanda idrica convenzionale, ossia la richiesta d'acqua che si ha in assenza di dispositivi di risparmio idrico installati; le due condizioni limite presentano i seguenti significati:

- $DMI = 0$ fa riferimento all'assenza di dispositivi di risparmio idrico, ossia alla condizione base relativa alla domanda idrica convenzionale;
- $DMI = 1$ rappresenta invece il caso ideale in cui il risparmio idrico è tale da conseguire il totale annullamento della domanda. I valori reali calcolati per i quattro diversi casi studio sono invece notevolmente inferiori al caso teorico e più dettagliatamente, come si potrà osservare dalla tabella 2.4, l'indice DMI assume un valore pari a circa 0,30 nel caso del

sistema, ossia dell'edificio, e a 0,62 per il sottosistema costituito dalle tre cisterne in serie: questi valori indicano una riduzione della domanda idrica che, a seguito dell'installazione dei dispositivi di risparmio idrico, è pari a circa il 30% e il 62% rispettivamente per l'edificio e per il sottosistema.

- $$WOI = \frac{Deflussi\ \ in\ \ fognatura(We)}{Domanda(D)} = \frac{\sum_{t=1}^{t=n}\left[D(t) - R_{act}(t) + O_2(t)\right]}{\sum_{t=1}^{t=n} D(t)} : \qquad (2.32)$$

il precedente parametro adimensionale è detto "Indice di Produzione delle Acque Grigie" (WOI, Waste Output Index) e consente di determinare l'efficienza del sistema in termini di minimizzazione delle acque grigie scaricate nella rete fognaria; questo coefficiente positivo deve essere tale da assumere i valori più bassi possibili, ossia deve tendere a zero, in modo da aumentare il rendimento del sistema relativamente al riciclo delle acque grigie, riducendo quindi gli sfiori e i conseguenti deflussi in fognatura. In particolare, si può osservare che il numeratore del rapporto, che definisce le acque defluenti nella rete fognaria, viene espresso in funzione della domanda idrica $D(t)$, delle acque grigie effettivamente riciclate $R_{act}(t)$ e degli sfiori $O_2(t)$, come indicato nell'espressione (2.30).

- $$SSI = \frac{Risorsa\ \ immagazzinata(Rh)}{Domanda(D)} = \frac{\sum_{t=1}^{t=n}\left[R_{act}(t) + M_{act}(t)\right]}{\sum_{t=1}^{t=n} D(t)} : \qquad (2.33)$$

quest'ultimo parametro è detto "Indice di Auto-Sostenibilità" (SSI, Self-Sustainable Index) e permette di calcolare la percentuale della domanda idrica domestica soddisfatta dalle acque grigie e meteoriche immagazzinate all'interno del serbatoio S_3. Analogamente all'indice DMI, anche questo parametro può assumere tutti i valori compresi nell'intervallo chiuso e limitato $[0;1]$: in particolare, se $SSI = 0$ il sistema RWH non è in grado di soddisfare, neanche in minima parte, la domanda di acqua non potabile $D_{Q2}(t)$ richiesta dall'utenza, mentre se $SSI = 1$ viene garantita la totale indipendenza dall'approvvigionamento idrico tradizionale $Ei_{Q2}(t)$.

I tre precedenti parametri possono essere calcolati relativamente a qualsiasi scala temporale, ad esempio giornaliera, settimanale o annuale, in riferimento alla singola unità abitativa (bu, building unit) oppure al sottosistema (ss, subsystem), dove quest'ultimo viene definito come il sistema di raccolta e trattamento delle acque grigie e di raccolta delle acque meteoriche.
Siccome d_{tap}, ossia la portata d'acqua richiesta per i rubinetti e le lavastoviglie, non viene riciclata, allora l'Indice di Auto-Sostenibilità dell'edificio è sempre inferiore all'unità $(SSI_{bu} < 1)$; inoltre, sulla base dei risultati riportati in tabella 2.4, è possibile definire la seguente disuguaglianza:

$$SSI_{ss} > SSI_{bu}, \qquad (2.34)$$

in quanto, pur essendo $Rh(t)$, ossia la risorsa idrica immagazzinata annualmente nel sistema, uguale in entrambi i casi, la domanda totale dell'edificio (D_{bu}) è sempre maggiore della domanda totale del sottosistema (D_{ss}); questo si verifica poiché:

$$\begin{cases} D_{bu} = D_{Q1} + D_{Q2} = D \\ D_{ss} = D_{Q2}. \end{cases} \tag{2.35}$$

Analizzando più dettagliatamente l'espressione (2.33), emerge che la differenza tra l'Indice di Auto-Sostenibilità del sottosistema (SSI_{ss}) e dell'edificio (SSI_{bu}) è funzione del rapporto adimensionale tra la domanda per usi non potabili garantita dall'acquedotto (D_{Q2}) e la domanda idrica totale (D), ossia del rapporto tra la domanda del sottosistema (D_{ss}) e quella dell'intero edificio (D_{bu}):

$$\frac{D_{Q2}}{D} = \frac{D_{ss}}{D_{bu}}. \tag{2.36}$$

Occorre infatti sottolineare che i due rapporti contenuti nella precedente espressione costituiscono il complementare dell'Indice di Auto-Sostenibilità SSI, in quanto la domanda idrica che non è garantita dallo sfruttamento delle acque grigie e meteoriche viene conseguentemente assicurata dai prelievi dalla rete acquedottistica; vale quindi la seguente uguaglianza:

$$\frac{D_{Q2}}{D} = \frac{R_{act}(t) + M_{act}(t)}{D} = 1 - \frac{Ei_{Q2}(t)}{D}. \tag{2.37}$$

2.1.4 Applicazione del modello di Agudelo-Vera et al. (2013) a due casi reali

L'obiettivo del presente paragrafo è quello di analizzare per un condominio con 56 residenti e una villa monofamiliare con 4 residenti, facendo riferimento per entrambi gli edifici sia alla domanda idrica convenzionale che a quella minimizzata (associata cioè all'installazione di dispositivi di risparmio idrico), le tre seguenti strategie previste dall'UHA:

- riciclaggio delle acque grigie utilizzate per il funzionamento delle docce dell'edificio;
- multi-sourcing, ossia l'utilizzo delle acque piovane captate dalla superficie di copertura;
- approccio combinato delle due precedenti strategie.

Per quanto concerne il riciclaggio, la capacità di trattamento $k\ \left[L^3 \cdot T^{-1}\right]$ è stata valutata facendo riferimento alla domanda idrica media oraria, mentre il tempo di permanenza idraulica $RT\ \left[T\right]$, sulla base delle indicazioni degli autori dello studio, è pari a 24 ore; inoltre, il volume del primo serbatoio $\left(v_1\right)$ è stato impostato relativamente alla produzione giornaliera media di acque grigie (LGW, Light GreyWater), mentre per quanto riguarda il serbatoio S_3 sono state analizzate diverse capacità.

L'Olanda, caratterizzata da una precipitazione media annua di circa 800 mm, presenta un grande potenziale in termini di $M_{pot}\left[m^3 \cdot y^{-1}\right]$, cioè di raccolta delle acque meteoriche per far fronte alla domanda di acqua non potabile $\left(D_{Q2}\right)$: questo termine è funzione dell'altezza annua di pioggia P $\left[m \cdot y^{-1}\right]$, dell'area della copertura $A\ \left[m^2\right]$ e del coefficiente di deflusso $RC\ \left[-\right]$ ed è quindi valutato tramite l'espressione $\left(2.15\right)$ precedentemente introdotta per eseguire la valutazione del bilancio idrico dell'edificio su scala oraria:

$$M_{pot}(t) = P(t) \cdot A \cdot RC\,. \qquad (2.15)$$

Il termine $M_{pot}(t)$, che compare nella precedente equazione, indica la portata oraria di acqua captata dalla copertura, che differisce da quella che entrerà realmente nel serbatoio $\left(M_{act}(t)\right)$: questo scarto è costituito dai possibili sfiori, che si verificano tutte le volte in cui la cisterna è piena e la portata in ingresso è diversa da zero. Il coefficiente di deflusso $\left(RC\right)$ è invece un termine adimensionale che esprime la porzione di pioggia trasformata in deflussi, prendendo in considerazione le perdite dovute alle fuoriuscite dalle grondaie, al dilavamento della copertura e all'evaporazione: i valori tipici di questo parametro sono compresi tra 0,7 e 0,9 e, in questo caso specifico, è stato assunto $RC = 0{,}7$; per quanto concerne infine l'altezza annua di pioggia, è stata utilizzata quella relativa all'anno 2010, con valore pari a $P(t) = 811 mm$, prossimo ai dati di pioggia media annua dell'Olanda.

Assumendo come livello di partenza dei consumi domestici il valore stimato nel 2010 da Foekema e van Thiel, pari a 124 litri giornalieri pro capite, è stata eseguita una ripartizione dell'utilizzo idrico residenziale, prendendo come modelli una casa monofamiliare e un condominio di medie dimensioni: per entrambi i casi, si è fatto riferimento sia alla domanda idrica giornaliera convenzionale che a quella minimizzata, dove quest'ultimo termine si riferisce all'installazione di dispositivi di risparmio idrico.

Per eseguire la simulazione della domanda idrica si è fatto ricorso a SIMDEUM, acronimo di "SIMulation of water Demand, an End-Use Model": si tratta di un modello stocastico sviluppato nel 2010 presso il KWR (Watercycle Research Institute) da Mirjam Blokker et al., basato su informazioni statistiche relative all'utilizzo idrico, tenendo in considerazione le differenze che intercorrono, in termini di portata, durata e frequenza di utilizzo, tra le diverse apparecchiature idriche. Per qualsiasi edificio residenziale, come case indipendenti e condomini, oppure non residenziale, come uffici, hotel e ospedali, le caratteristiche degli apparecchi idrici installati sono valutate in funzione dello stile di vita dei residenti. SIMDEUM calcola, per ogni dispositivo idrico installato nell'edificio in esame, l'istante temporale in cui è utilizzato e la relativa tipologia di utenza, generando un modello che fornisce una stima affidabile della domanda idrica complessiva.

Nella tabella seguente sono riportati i dati ottenuti dalle simulazioni eseguite con SIMDEUM, che costituiscono i dati di input:

Apparecchio idrico	***Casa monofamiliare***		***Condominio di medie dimensioni***	
	Domanda convenzionale $\left[\frac{l}{d \cdot p}\right]$	***Domanda minimizzata*** $\left[\frac{l}{d \cdot p}\right]$	***Domanda convenzionale*** $\left[\frac{l}{d \cdot p}\right]$	***Domanda minimizzata*** $\left[\frac{l}{d \cdot p}\right]$
Doccia	50,7	43,9	50,7	43,9
WC	32,1	4,8	32,1	4,8
Lavatrice	13,5	12,0	14,5	13,0
Lavandino cucina	8,7	8,7	16,8	16,8
Lavandino bagno	4,0	4,0	4,0	4,0
Lavastoviglie	3,1	3,1	3,9	3,9
Vasca da bagno	7,7	7,7	0,0	0,0
Totale	119,8	84,2	122,0	86,4

Tabella 2.2: Consumi idrici giornalieri convenzionali e minimizzati per i due edifici [Fonte: Agudelo-Vera, Keesman, Mels, Rijnaarts, 2013].

Dai risultati ottenuti si osserva che il consumo idrico giornaliero pro capite presenta valori simili per i due edifici, mentre le differenze sono relative ai singoli contributi: la principale è rappresentata dal consumo associato alla vasca da bagno, che costituisce il 6,4% del totale per la casa monofamiliare, mentre per il condominio esso è nullo in quanto non è prevista la sua installazione. I consumi idrici maggiori sono invece relativi alla doccia e al WC, con valori, nel caso di domanda convenzionale, dell'ordine rispettivamente del 42% e del 26% per entrambi gli edifici; queste percentuali si riducono del 13,4% per la doccia e del 85,1% per il WC nel caso di installazione di dispositivi di risparmio idrico. L'ultima voce su cui può essere attuata la riduzione dei consumi è costituita dalla lavatrice, con valori che scendono del 6,6% e del 10,3% rispetto al caso di domanda idrica convenzionale.

I precedenti termini possono essere raggruppati nelle quattro categorie seguenti, in modo da valutare numericamente le grandezze che compaiono nell'equazione (2.6) del bilancio idrico dell'edificio:

Domanda idrica	***Casa monofamiliare***		***Condominio di medie dimensioni***	
	Domanda convenzionale	***Domanda minimizzata***	***Domanda convenzionale***	***Domanda minimizzata***
d_{tap}	$15{,}8\ \frac{l}{d \cdot p}$	$15{,}8\ \frac{l}{d \cdot p}$	$24{,}7\ \frac{l}{d \cdot p}$	$24{,}7\ \frac{l}{d \cdot p}$
	13,19 %	18,76 %	20,25 %	28,58 %
d_{lau}	$13{,}5\ \frac{l}{d \cdot p}$	$12{,}0\ \frac{l}{d \cdot p}$	$14{,}5\ \frac{l}{d \cdot p}$	$13{,}0\ \frac{l}{d \cdot p}$
	11,27 %	14,26 %	11,89 %	15,05 %
d_{toi}	$32{,}1\ \frac{l}{d \cdot p}$	$4{,}8\ \frac{l}{d \cdot p}$	$32{,}1\ \frac{l}{d \cdot p}$	$4{,}8\ \frac{l}{d \cdot p}$
	26,79 %	5,70 %	26,31 %	5,56 %
d_{sho}	$58{,}4\ \frac{l}{d \cdot p}$	$51{,}6\ \frac{l}{d \cdot p}$	$50{,}7\ \frac{l}{d \cdot p}$	$43{,}9\ \frac{l}{d \cdot p}$
	48,75 %	61,28 %	41,55 %	50,81 %

Tabella 2.3: Categorie della domanda idrica giornaliera pro capite.

I modelli annuali sono stati costruiti, per entrambe le tipologie di edificio, simulando i consumi giornalieri per tutti i giorni dell'anno, sia considerando la domanda idrica convenzionale che quella minimizzata. La figura seguente rappresenta la media e lo scarto quadratico medio della domanda idrica oraria per l'intero edificio, per tutti i quattro sotto-casi in esame nell'arco delle 24 ore di una giornata con consumi idrici medi. Come previsto, gli scarti quadratici medi sono maggiori per una villa monofamiliare che per un condominio: quest'ultimo edificio è infatti costituito dalla somma di 28 appartamenti con 2 residenti ciascuno, quindi all'aumentare del numero di utenti diminuisce l'incertezza relativa ai consumi.

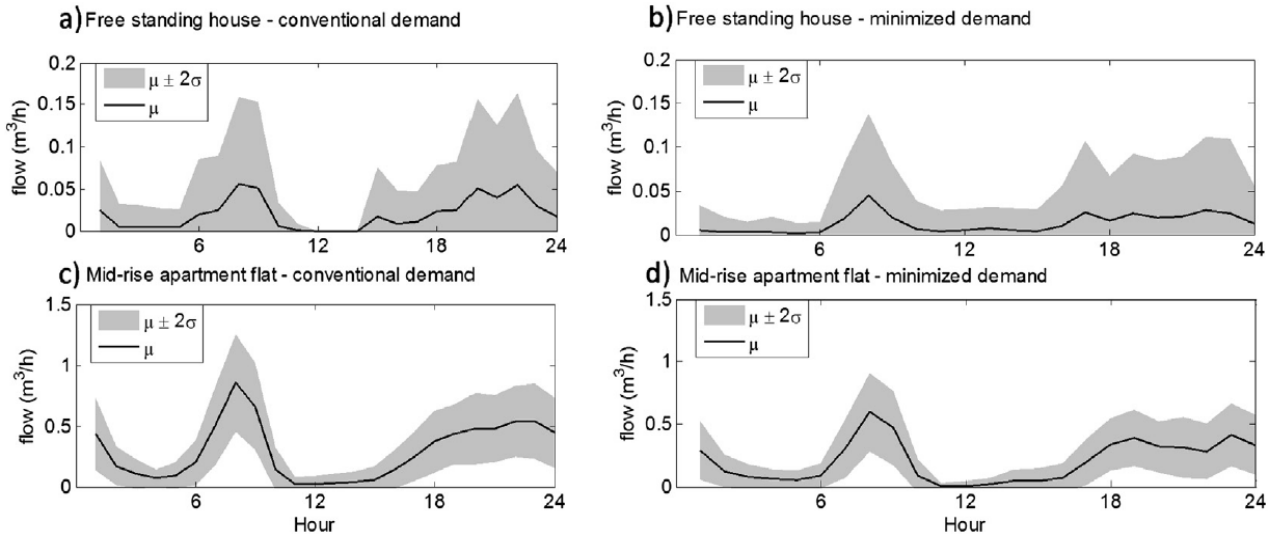

Figura 2.7: Simulazione dei consumi idrici nell'arco delle 24 ore
a) villa monofamiliare - domanda convenzionale b) villa monofamiliare - domanda minimizzata
c) condominio - domanda convenzionale d) condominio - domanda minimizzata
[Fonte: Agudelo-Vera, Keesman, Mels, Rijnaarts, 2013].

Nonostante il consumo idrico medio giornaliero pro capite sia simile per entrambe le tipologie di edificio, il confronto dei modelli temporali mette in evidenza il fatto che non sia soddisfatto il principio di sovrapposizione degli effetti: questo significa che il consumo idrico per una famiglia composta da quattro persone non è pari al doppio di quello che si ha per appartamenti abitati da due persone. In generale, il consumo idrico pro capite è influenzato dalle dimensioni del nucleo famigliare, mentre i modelli temporali aggregati sono di tipo non lineare: questa non linearità è dovuta, oltre che ad altri fattori secondari, soprattutto a differenze nell'utilizzo degli apparecchi idrici, a sua volta correlato alla dimensione del nucleo familiare e alla sua composizione, in termini di numero di adulti e di bambini.

La tabella seguente mostra i risultati della simulazione SIMDEUM attraverso l'impiego degli indici di profilo metabolico: in particolare, viene calcolato il massimo valore che gli indici DMI, SSI e WOI possono assumere alla scala temporale annuale, dove l'aggettivo "massimo" fa riferimento alla massimizzazione del volume di acque grigie trattate dal sistema di depurazione o del volume di acque meteoriche captate dalla superficie della copertura dell'edificio.

Gli Indici di Minimizzazione della Domanda, che determinano l'efficienza del sistema, sono stati calcolati sia a livello di sottosistema (DMI_{ss}) che a scala di edificio (DMI_{bu}) tramite l'impiego di apparecchi di risparmio idrico per la doccia e il WC, nonché di una lavatrice a basso consumo di acqua. Per entrambi gli edifici, la minimizzazione della domanda idrica convenzionale è pari al 62% per il sottosistema, mentre corrisponde al 32% per l'edificio.

Grandezza	Casa monofamiliare		Condominio	
	Convenzionale	Minimizzata	Convenzionale	Minimizzata
$D\ [m^3/year]$	172	117	2590	1820
$D_{Q2}\ [m^3/year]$	60	23	969	364
DMI_{ss}	0,00	0,62	0,00	0,62
DMI_{bu}	0,00	0,32	0,00	0,30
Riciclaggio potenziale massimo				
$R_{pot}[m^3/year]$	89	72	1112	952
$SSI_{ss,\max}$	1,00	1,00	1,00	1,00
$SSI_{bu,\max}$	0,35	0,20	0,37	0,20
$WOI_{ss,\min}$	0,48	2,12	0,15	1,62
Multi-sourcing potenziale massimo				
$M_{pot}[m^3/year]$	34	34	358	358
$SSI_{ss,\max}$	0,56	1,00	0,37	0,98
$SSI_{bu,\max}$	0,20	0,29	0,14	0,20
$WOI_{ss,\min}$	0,00	0,47	0,00	0,00
Combinazione potenziale riciclaggio e multi-sourcing massimi				
$R_{pot} + M_{pot}[m^3/year]$	122	105	1470	1310
$SSI_{ss,\max}$	1,00	1,00	1,00	1,00
$SSI_{bu,\max}$	0,35	0,20	0,37	0,20
$WOI_{ss,\min}$	1,04	3,59	0,52	2,60

Tabella 2.4: Valori annuali simulati con il software SIMDEUM per i 4 casi di studio. [Fonte: Agudelo-Vera, Keesman, Mels, Rijnaarts, 2013].

La precedente tabella contiene anche informazioni relative al massimo potenziale del riciclaggio delle acque grigie e dello stoccaggio delle acque piovane; facendo riferimento alla produzione media annua, il riciclaggio potenziale (R_{pot}) determina per il sottosistema un valore massimo dell'Indice di Auto-Sostenibilità $(SSI_{ss,\max})$, pari ad 1 per tutti i quattro casi esaminati: ciò indica che il riciclaggio delle acque grigie può sopperire al 100% della domanda di acqua di seconda qualità (D_{Q2}), con conseguente produzione di sfiori. Facendo riferimento alla scala di edificio, i valori sono invece nettamente inferiori.

Si può inoltre osservare, facendo riferimento alla tabella 2.4, che l'approccio di raccolta delle acque piovane determina per il sottosistema un valore massimo dell'Indice di Auto-Sostenibilità $\left(SSI_{ss,\max}\right)$ compreso, a seconda del caso di studio, tra 0,37 e 1,00; alla scala di edificio $\left(SSI_{bu,\max}\right)$ i valori sono invece compresi tra 0,14 e 0,29: le differenze così marcate che intercorrono tra i due sistemi sottolineano l'importanza di valutare contemporaneamente diverse scale spaziali.

La terza strategia analizzata, ossia l'approccio combinato di riciclaggio delle acque grigie e di raccolta delle acque meteoriche, determina a livello di sottosistema la massimizzazione delle risorse idriche recuperate $\left(SSI_{ss,\max}=1{,}00\right)$, ma produce al tempo stesso il massimo volume di sfioro: questo permette di osservare che il parametro $WOI_{ss,\min}$ (Indice di Produzione delle Acque Grigie) presenta sempre i valori massimi rispetto alle altre due strategie prese in esame, ossia l'approccio di riciclaggio delle acque grigie e quello di captazione delle acque piovane considerati singolarmente.

La tabella seguente fornisce le informazioni relative ai primi due serbatoi che compongono il sottosistema: la capacità della prima cisterna è pari al valore più prossimo alla produzione media giornaliera di acque grigie ed è pari a 0,2 m^3 per la casa monofamiliare e a 2,6 m^3 per il condominio; il volume del secondo serbatoio è stato invece calcolato come il prodotto tra la capacità di trattamento k, impostata in base alla domanda media oraria, e il tempo di residenza idraulica RT, assunto pari a 24 ore per tutti i quattro casi analizzati, secondo l'equazione (2.1).

Grandezza	***Casa monofamiliare***		***Condominio di medie dimensioni***	
	Domanda convenzionale	***Domanda minimizzata***	***Domanda convenzionale***	***Domanda minimizzata***
k [l/h]	7	3	111	42
v_1 [m^3]	0,200	0,200	2,600	2,600
$v_2 = k \cdot RT$ [m^3]	0,168	0,072	2,664	1,008

Tabella 2.5: Specifiche del sottosistema
[Fonte: Agudelo-Vera, Keesman, Mels, Rijnaarts, 2013].

Nelle due figure seguenti sono riportati gli andamenti della risorsa idrica immagazzinata (Rh), analizzando, per entrambe le tipologie di edificio, il riciclaggio effettivo (R_{act}) e la raccolta delle acque meteoriche (M_{act}), prima separatamente e poi in base ad un approccio combinato.

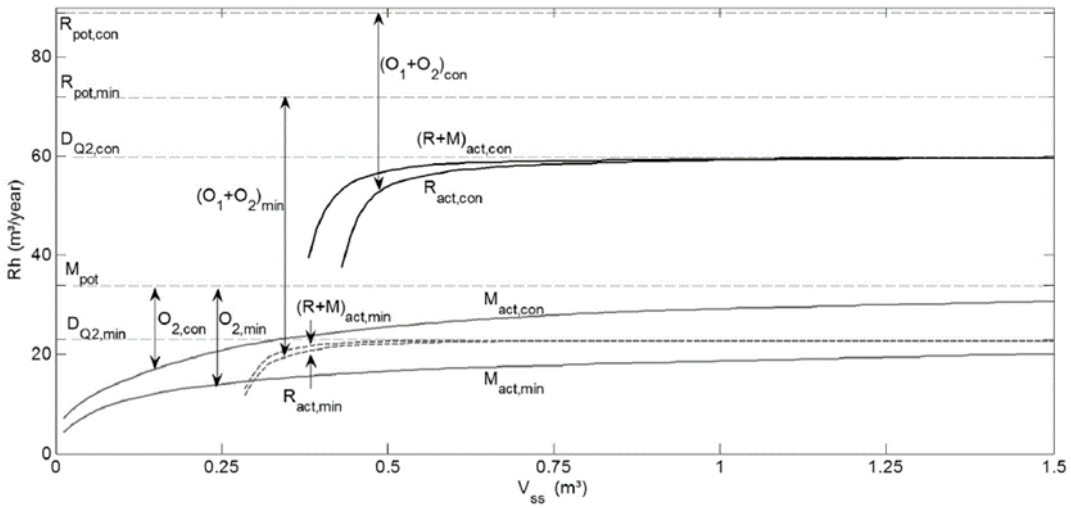

Figura 2.8: Risorse idriche raccolte per la villa monofamiliare in base alle tre strategie [Fonte: Agudelo-Vera, Keesman, Mels, Rijnaarts, 2013].

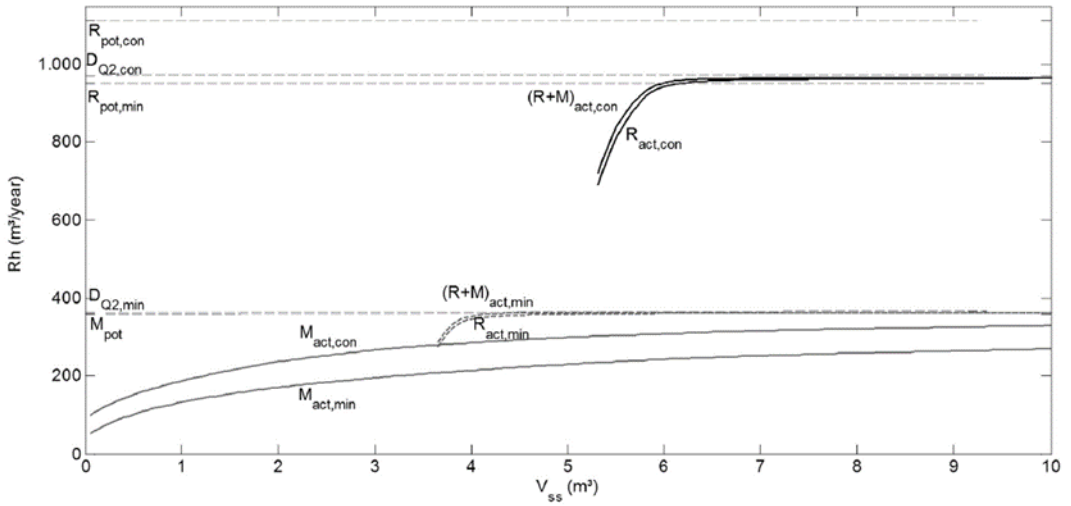

Figura 2.9: Risorse idriche raccolte per il condominio in base alle tre strategie [Fonte: Agudelo-Vera, Keesman, Mels, Rijnaarts, 2013].

Questo parametro, noto anche con l'espressione inglese "Resources harvested", è espresso in funzione della capacità di stoccaggio del sottosistema $\left(v_{ss} = v_1 + v_2 + v_3\right)$, sia nel caso di domanda convenzionale che di domanda minimizzata per tutte le tre strategie considerate:

- riciclaggio effettivo delle acque grigie $\left(R_{act}\right)$;
- stoccaggio effettivo delle acque piovane $\left(M_{act}\right)$;
- combinazione dei due precedenti approcci $\left(R_{act} + M_{act}\right)$.

La pendenza delle curve riportate in figura 2.8 e 2.9, ossia la derivata della funzione *Rh* (Risorsa immagazzinata) calcolata rispetto al volume v_{ss} del sottosistema, esprime, per ognuno dei due edifici

considerati e facendo riferimento sia alla domanda idrica convenzionale che a quella minimizzata, il beneficio delle sei soluzioni di approvvigionamento idrico alternativo: occorre infatti sottolineare che al diminuire del coefficiente angolare delle curve, pur aumentando il volume della risorsa idrica annua recuperata (Rh), cresce in maniera ancora più sensibile il volume del sottosistema (v_{ss}) e quindi il costo dei tre serbatoi. Per tutti i casi di studio, la pendenza delle curve si riduce progressivamente fino a tendere a zero, soprattutto in relazione al riciclaggio e all'approccio combinato, in quanto la domanda di acqua non potabile (D_{Q2}), espressa graficamente da una retta orizzontale, viene soddisfatta in maniera pressoché totale; raggiunto tale valore della domanda, l'ulteriore beneficio proveniente dall'installazione di sistemi con capacità maggiore si annulla progressivamente.

Il vantaggio massimo, in termini di risorsa idrica recuperata, si consegue con l'approccio combinato; il volume annuo stoccato nel sistema è inoltre superiore nel caso del solo riciclaggio delle acque grigie rispetto all'approccio multi-sourcing di raccolta delle acque piovane, determinando quindi una minore capacità dei serbatoi necessaria per conseguire un prefissato valore della risorsa idrica immagazzinata (Rh). La captazione delle acque meteoriche costituisce infine l'approccio più sfavorevole, poiché il volume della risorsa idrica annua raccolta (Rh) è tale da soddisfare solamente la domanda minimizzata di acqua non potabile (D_{Q2}).

E' importante osservare che configurazioni simili del sottosistema determinano prestazioni diverse, come diretta conseguenza del numero e della tipologia di residenti e dell'eventuale presenza di dispositivi di risparmio idrico, nonché del tipo di strategia di approvvigionamento implementata.

Complessivamente, si può riscontrare che:

- il riciclaggio delle acque grigie, per tutti i quattro caso di studio, può sopperire al 100% della domanda di acqua non potabile (D_{Q2}), determinando quindi un eccesso della risorsa idrica con conseguente sfioro, che defluisce nella rete fognaria: è tuttavia possibile ridurre ulteriormente questi sprechi impiegando gli sfiori per far fronte alla domanda idrica esterna all'edificio, condizione che tuttavia non è stata presa in esame in questo studio. Inoltre, relativamente alla domanda idrica convenzionale, il riciclaggio potenziale (R_{pot}) copre rispettivamente il 35% e il 37% della domanda totale (D) per le due tipologie di edificio;

- la raccolta delle acque piovane, pur essendo la strategia più svantaggiosa in termini di volume idrico raccolto annualmente, è in grado di garantire quasi totalmente la domanda minimizzata di acqua non potabile (D_{Q2}), rispettivamente per una casa indipendente e per un condominio;

- per una data capacità di stoccaggio, i rendimenti sono leggermente maggiori per un approccio misto (riciclaggio acque grigie + raccolta acque meteoriche) rispetto al solo riciclaggio; l'approccio multi-sourcing di raccolta delle acque piovane presenta infine la resa minore.

2.1.5 Conclusioni

In definitiva esistono due condizioni per soddisfare la domanda idrica sfruttando le risorse rinnovabili a scala di edificio. La prima condizione è relativa alla disponibilità di tali risorse: le limitazioni associate all'accessibilità di acqua non potabile sono dovute sia dalla disparità tra il riciclaggio potenziale delle acque grigie (R_{pot}) e la domanda idrica (D_{Q2}), sia dalla disponibilità limitata di acqua piovana (M_{pot}), a sua volta funzione delle condizioni locali, come ad esempio un clima siccitoso o un'estensione limitata della copertura. Il secondo vincolo è invece relativo ai limiti pratici per lo stoccaggio delle acque grigie e meteoriche, dovuti alla ridotta disponibilità di spazio. Oltre allo spazio fisico disponibile, il dimensionamento dei serbatoi dipende da altri fattori, come la capacità di trattamento (k), il rapporto tra l'approvvigionamento e la domanda idrica e la presenza di dispositivi di risparmio idrico, determinando quindi le maggiori difficoltà nella progettazione del serbatoio S_3.

I risultati ottenuti sottolineano l'importanza di conoscere dettagliatamente le condizioni locali per progettare efficacemente i sistemi decentralizzati di raccolta e di riutilizzo delle acque: l'uso dell'acqua, l'efficienza dei sistemi di riciclaggio delle acque grigie e dei sistemi di raccolta delle acque meteoriche sono caratteristiche intrinseche del sito analizzato. Il confronto diretto tra i vari casi è inoltre ostacolato dall'interazione non lineare che intercorre tra i diversi fattori che determinano l'efficienza del sistema, quali la domanda idrica (D), quella minimizzata (D_{Q2}) e il volume v_{ss} del sottosistema: questo fa sì che il rendimento sia difficile da valutare, soprattutto quando le dinamiche non sono comprese chiaramente.

La metodologia presentata in questo studio non analizza solamente il rendimento ma quantifica anche gli sfiori dal sottosistema: i risultati ottenuti mostrano che un grande potenziale viene sprecato quando si analizza esclusivamente la scala di edificio: l'ottimizzazione dei cicli idrici deve includere anche lo studio di scale spaziali di dimensioni maggiori, in modo da migliorare il profilo metabolico mediante la conversione degli sfiori defluenti nella rete fognaria in risorse utilizzabili da altre utenze.
L'implementazione dell'approccio UHA a scala di edificio determinerà da un lato effetti positivi sulla risorsa idrica riutilizzabile, anche grazie all'impiego dei volumi di sfioro per usi esterni, ma produrrà anche ripercussioni notevoli sul bilancio idrico a scala urbana: una minore richiesta idrica dal sistema centralizzato aumenta infatti il tempo di residenza idraulica nella rete acquedottistica municipale; le conseguenze interessano anche il sistema fognario, che è progettato sulla base dei flussi medi e dei fattori di picco, i quali varierebbero totalmente. Il dimensionamento dei sistemi idrici alternativi, necessari per soddisfare la domanda di acqua non potabile (D_{Q2}), deve essere valutato considerando anche diversi fattori limitanti, quali i regimi pluviometrici e i modelli temporali relativi alla disponibilità di acque grigie e meteoriche, all'utilizzo idrico e alla capacità dei serbatoi di stoccaggio e di trattamento, che costituiscono grandezze variabili in funzione del singolo caso oggetto di studio.

2.1.6 Tabella riassuntiva del modello di Agudelo-Vera et al. (2013)

Nella tabella seguente è riportato un elenco di tutti i parametri, con relative unità di misura, che devono essere implementati in modo da definire l'equazione di continuità (2.6) su cui si fonda il modello di Agudelo-Vera:

Simbolo	***Significato fisico***	***Unità di misura***
$d_{sho}(t)$	Domanda idrica per l'utilizzo della doccia e della vasca da bagno	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
$d_{toi}(t)$	Domanda idrica per l'utilizzo del WC	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
$d_{lau}(t)$	Domanda idrica per l'utilizzo della lavatrice	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
$d_{tap}(t)$	Domanda idrica per l'utilizzo dei lavandini e della lavastoviglie	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
$s_1(t)$	Volume di acqua stoccata nel primo serbatoio su base oraria	$[m^3]$
v_1	Capacità del primo serbatoio	$[m^3]$
$O_1(t)$	Portata sfiorata dal primo serbatoio	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
k	Capacità di trattamento delle acque grigie	$[l \cdot h^{-1}]$
RT	Tempo di residenza idraulica	$[h]$
$s_3(t)$	Volume di acqua stoccata nel terzo serbatoio su base oraria	$[m^3]$
v_3	Capacità del terzo serbatoio	$[m^3]$
$O_2(t)$	Portata sfiorata dal terzo serbatoio	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
$R_{act}(t)$	Portata effettiva delle acque grigie riciclate	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
$P(t)$	Intensità oraria di precipitazione	$[m \cdot h^{-1}]$
A	Area della proiezione orizzontale della copertura	$[m^2]$
RC	Coefficiente di deflusso	$[-]$
$M_{act}(t)$	Portata oraria effettiva di acque piovane raccolte dal tetto	$[m^3 \cdot h^{-1}]$

Tabella 2.6: Input del modello di Agudelo-Vera et al. (2013).

Una volta determinati questi termini è possibile implementarli, nell'ottica dell'approccio UHA, allo scopo di calcolare, sia con riferimento alla domanda idrica convenzionale che a quella minimizzata (associata cioè all'installazione di dispositivi di risparmio idrico), i tre indici di profilo metabolico (DMI, WOI ,SSI); questi ultimi, calcolati sulla base delle relazioni (2.31), (2.32) e (2.33), sono impiegati per valutare la migliore soluzione, in termini di massimizzazione dell'efficienza idrica dell'edificio, tra le seguenti tre alternative:

- riciclaggio delle acque grigie;
- Multi-sourcing, ossia utilizzo delle acque piovane;
- approccio combinato delle due precedenti strategie.

Tale soluzione è espressa in termini di:

- DMI : minimizzazione della domanda idrica dell'edificio;
- WOI : massimizzazione delle acque grigie defluenti nella rete fognaria;
- SSI : soddisfacimento della domanda idrica per mezzo dell'approccio idrico alternativo.

3. Modello di bilancio idrico proposto da Pelak e Porporato (2016)

Questo modello viene applicato su scala temporale giornaliera e considera un sottocaso del bilancio idrico a scala di edificio, analizzando il bilancio di massa dell'acqua contenuta all'interno di un serbatoio RWH: il termine precedente è l'acronimo di RainWater Harvesting e indica una particolare tipologia di approvvigionamento idrico, in cui le acque meteoriche raccolte dalla copertura dell'edificio sono stoccate in una cisterna e destinate a soddisfare la domanda idrica, in questo caso per l'utilizzo dei WC.

L'equazione di riferimento è la seguente:

$$V\frac{dc}{dt} = \phi \cdot A \cdot R(t;\alpha;\lambda) - H(c) - Q(c), \tag{3.1}$$

con:

- V : Volume del sistema, definito dalla capacità del serbatoio di raccolta $\left[m^3\right]$;
- c : Volume di accumulo normalizzato, variabile tra 0 e 1 $\left[-\right]$: questo termine si ottiene dividendo il volume di acqua stoccata nel serbatoio per la capacità del medesimo;
- t : Tempo $\left[d\right]$;
- ϕ : Coefficiente di deflusso $\left[-\right]$;
- A : Area efficace della superficie di captazione $\left[m^2\right]$;
- R : Tasso di precipitazione $\left[m \cdot d^{-1}\right]$ associato ad un evento meteorico con:
  - α : Altezza dell'evento medio di pioggia $\left[mm\right]$;
  - λ : Frequenza di precipitazione $\left[d^{-1}\right]$;
- H : Tasso di domanda idrica soddisfatta dal serbatoio $\left[m^3 \cdot d^{-1}\right]$;
- Q : Tasso di perdite dovute agli sfiori $\left[m^3 \cdot d^{-1}\right]$.

Dalla precedente espressione si evince che il volume di acqua accumulata nel serbatoio dipende dalle tre seguenti grandezze, che sono valutate su una scala temporale giornaliera:

- $\phi \cdot A \cdot R(t;\alpha;\lambda)$: portata di precipitazione captata dalla superficie effettiva della copertura;
- $H(c)$: domanda idrica giornaliera soddisfatta dal serbatoio;
- $Q(c)$: portata di sfioro, considerata solo in caso di riempimento totale del serbatoio.

L'equazione (3.1), che definisce il bilancio idrico della cisterna di raccolta delle acque piovane, può essere schematizzata con la figura seguente:

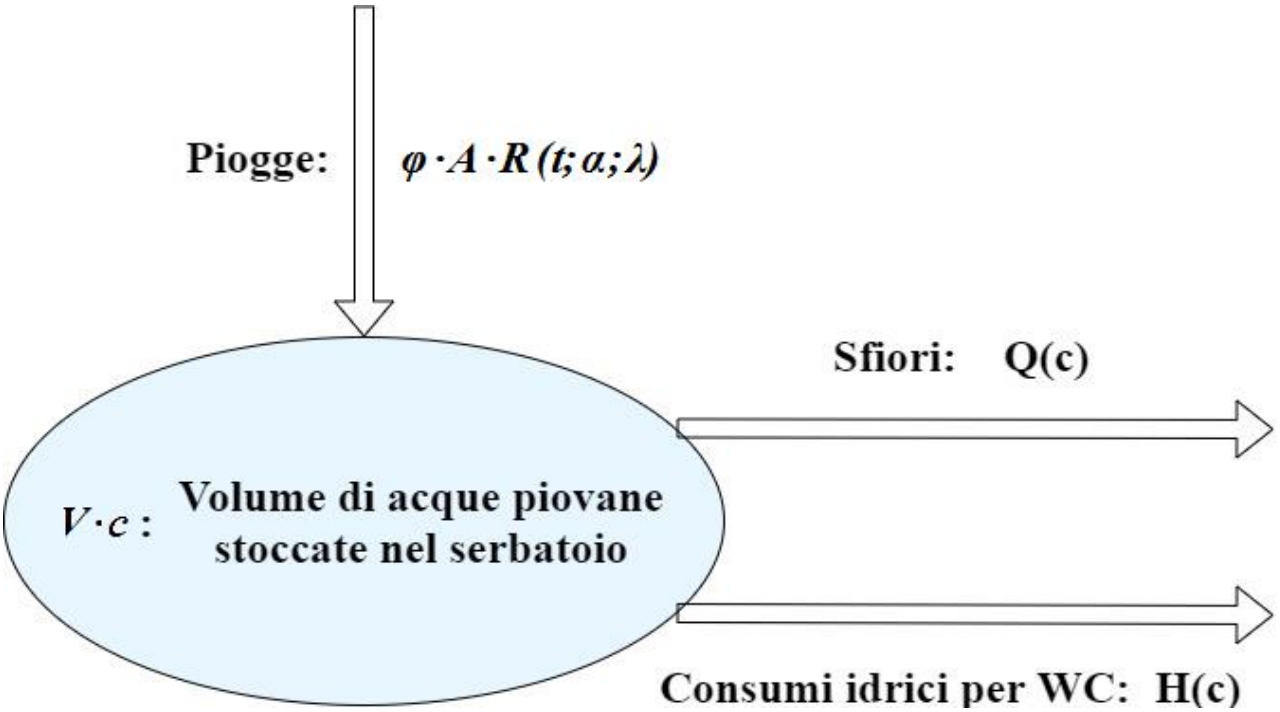

Figura 3.1: Schema del bilancio idrico del serbatoio per la raccolta delle acque meteoriche.

L'ipotesi semplificativa di base consiste nell'assumere la cisterna coperta, in modo da poter trascurare le perdite per evapotraspirazione.

Il coefficiente di deflusso ϕ è funzione di diversi parametri, in particolare del materiale che costituisce la superficie di captazione e della pendenza del tetto, nonché dell'efficienza del sistema di raccolta delle acque; un'analisi elaborata da Farreny, Pinzón, Guisasola e Durany nel 2011 ha stabilito che, nel caso di coperture realizzate con materiali artificiali, questo coefficiente adimensionale può variare nell'intervallo chiuso e limitato $[0{,}7;0{,}95]$, nonostante il valore possa essere notevolmente inferiore per i cosiddetti "tetti verdi". Per non influenzare qualitativamente i risultati, non viene considerata la possibilità di allontanare dal serbatoio di raccolta le "acque di prima pioggia" (first flush water), ossia i primi 5 mm di acqua precipitata durante un evento meteorico per ogni metro quadrato di superficie impermeabile dotata di rete drenante: queste acque sono di bassa qualità poiché presentano un'alta concentrazione di inquinanti di varia natura e origine, che si accumulano sulla superficie di captazione nei periodi di tempo siccitoso che precedono un evento meteorico, e sono pertanto separate dalla pioggia di dilavamento, o di "seconda pioggia", nei moderni sistemi RWH.

La terza ipotesi semplificativa del modello fa infine riferimento ad un caso ideale, in quanto ipotizza l'assenza delle perdite distribuite lungo il sistema di trasporto dell'acqua piovana dalla superficie di copertura al serbatoio, così come l'assenza di perdite in corrispondenza del serbatoio di raccolta.

Di seguito sono riportate tutte le formulazioni atte a modellare i tre termini in ingresso e in uscita.

Per quanto riguarda le precipitazioni, le simulazioni numeriche delle stesse sono state eseguite supponendo che gli eventi di pioggia siano un processo di Poisson caratterizzato da determinati valori dei parametri α e λ, questi ultimi ricavati a partire dalle serie storiche: questo processo, che prende il nome dal matematico francese Siméon-Denis Poisson, indica un processo stocastico che simula il manifestarsi di eventi tra loro indipendenti. Il tasso di precipitazione medio è valutato per mezzo della relazione sottostante:

$$\langle R \rangle = \lambda \cdot \alpha \,, \tag{3.2}$$

cioè come il prodotto della frequenza di pioggia (λ) per l'altezza dell'evento medio di pioggia (α), dove le parentesi $\langle\ \rangle$ indicano il valore medio della variabile stocastica; moltiplicando questo termine per il coefficiente di deflusso (ϕ) e per l'area della proiezione orizzontale della copertura (A) si ottiene la portata di precipitazione captata $(\phi \cdot A \cdot R(t;\alpha;\lambda))$.

Il tasso di domanda idrica soddisfatta dal serbatoio (H) è invece funzione del volume di accumulo normalizzato (c) ed è valutato con la formula (3.3):

$$H(c) = \begin{cases} 0 & \text{se} \quad \begin{cases} c = 0 \\ c > 0, \end{cases} \\ h \end{cases} \tag{3.3}$$

dove h esprime il tasso di domanda idrica $\left[m^3 \cdot d^{-1}\right]$, ossia il volume di acqua richiesta quotidianamente dall'utenza per l'utilizzo del WC, ottenuto effettuando il prodotto tra il numero di residenti, il numero di utilizzi giornalieri pro capite del WC e il volume di acqua consumato ad ogni utilizzo, ed è pertanto un valore costante. La precedente relazione indica che quando $c = 0$ il serbatoio è vuoto e la domanda idrica per il WC viene quindi garantita da un'altra fonte, come ad esempio la rete acquedottistica municipale; quando invece $c > 0$, il serbatoio è parzialmente o totalmente pieno e il tasso di domanda idrica dell'edificio (h) è quindi soddisfatto, almeno in parte, dal serbatoio.

Il tasso di perdite dovute allo sfioro dalla cisterna è invece calcolato tramite l'espressione (3.4):

$$Q(c) = (\phi \cdot R \cdot A - V \cdot (1-c)) \cdot \Theta(\phi \cdot R \cdot A - V \cdot (1-c)), \tag{3.4}$$

dove Θ rappresenta la funzione a gradino Heaviside (Heaviside step function), di seguito rappresentata; facendo riferimento alla figura sottostante, Θ vale 0 in assenza di sfiori, cioè a partire dalla condizione di serbatoio vuoto $(c = 0)$ fino a quella di serbatoio pieno $(c = 1)$; Θ assume invece il valore unitario quando la cisterna risulta piena e contemporaneamente il volume di acqua piovana in eccesso sfiora $(c > 1)$.

Analiticamente si fa riferimento alla seguente relazione:

$$\Theta = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \text{se} \quad \begin{cases} 0 \le c \le 1 \\ c > 1. \end{cases} \tag{3.5}$$

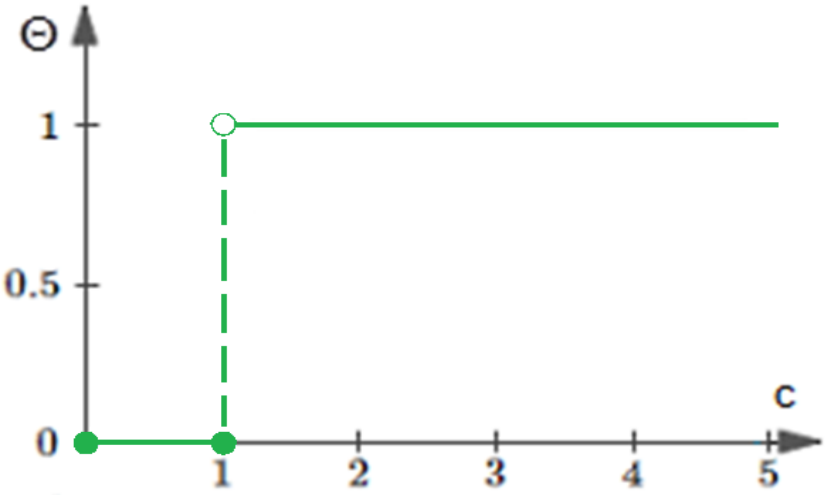

Figura 3.2: Funzione a gradino Heaviside per la valutazione dello sfioro dal serbatoio.

3.1 Analisi con parametri adimensionali

Il sistema può essere descritto definendo inizialmente le quattro seguenti variabili: $\alpha, \lambda, \frac{V}{\phi \cdot A}, \frac{h}{V}$, le quali sono tutte espresse tramite un'opportuna combinazione delle due seguenti unità dimensionali base: lunghezza $[m]$ e tempo $[d]$; applicando il teorema di Buckingham, conosciuto anche come teorema Pi greco, le precedenti variabili possono essere ricondotte ai soli due seguenti gruppi adimensionali, espressi rispettivamente dalle equazioni (3.6) e (3.7):

$$\gamma = \frac{V}{\phi \cdot A \cdot \alpha}, \tag{3.6}$$

$$D_c = \frac{h}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle}. \tag{3.7}$$

La formula (3.6) riporta l'espressione del volume adimensionale del serbatoio (γ), ossia un parametro che permette di relazionare il volume reale della cisterna installata (V) con il volume di acqua piovana che confluisce nella stessa durante un evento medio di precipitazione $(\phi \cdot A \cdot \alpha)$: questo rapporto può assumere tutti i valori compresi nell'intervallo aperto $(0;+\infty)$, dove questi due valori limite si applicano rispettivamente quando la capacità del serbatoio è trascurabile oppure preponderante

rispetto al volume defluito nella sezione di chiusura della copertura durante l'evento di pioggia medio. La relazione (3.7) esprime invece l'indice di domanda del serbatoio (D_c), ossia la grandezza adimensionale definita dal rapporto tra il tasso di domanda idrica (h) e il tasso di precipitazione, espresso in $m^3 \cdot d^{-1}$, catturata dalla copertura durante un evento medio di pioggia $(\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle)$: se tale parametro assume il valore unitario, allora la portata di acqua piovana che defluisce nel serbatoio è uguale a quella necessaria a soddisfare la domanda dell'utenza, mantenendo quindi costante il volume stoccato; se invece $D_c > 1$ la cisterna si sta riempiendo, mentre se $D_c < 1$ essa si sta svuotando.

I due parametri adimensionali introdotti con le equazioni (3.6) e (3.7) svolgono un ruolo fondamentale all'interno di un'analisi di tipo probabilistico, in quanto costituiscono le variabili necessarie a definire le due probabilità $p(c)$ e p_0 (Milly, 1993; Rodriguez-Iturbe e Porporato, 2004):

$$p(c) = \frac{\gamma}{D_c} \cdot p_0 \cdot e^{\gamma \cdot \left(\frac{1}{D_c} - 1\right) \cdot c}, \tag{3.8}$$

$$p_0 = \frac{1 - D_c}{e^{\gamma \cdot \left(\frac{1}{D_c} - 1\right)} - D_c}. \tag{3.9}$$

Le relazioni (3.8) e (3.9) esprimono le soluzioni allo stato stazionario relative rispettivamente alla funzione di densità di probabilità $p(c)$ (PDF, Probability Density Function), ossia la probabilità associata ad ogni valore che il volume di accumulo normalizzato (c) può assumere, e all'atomo di probabilità p_0 relativo invece al caso particolare di serbatoio vuoto $(c = 0)$.

Le due precedenti equazioni possono essere riscritte in una forma semplificata qualora l'indice di domanda del serbatoio (D_c) valga 1, ossia nel caso di tasso di domanda idrica domestica pari al tasso di precipitazione catturata; in questo caso sia $p(c)$ che p_0 sono funzione esclusivamente del volume adimensionale della cisterna (γ), come è possibile osservare nelle espressioni sottostanti:

$$p(c) = \frac{\gamma}{1 + \gamma}, \tag{3.10}$$

$$p_0 = \frac{1}{1 + \gamma}. \tag{3.11}$$

Nelle figure seguenti sono riportati, a titolo di esempio, l'andamento della Funzione di Densità di Probabilità $p(c)$ e il valore dell'atomo di probabilità p_0, definiti con le equazioni (3.8) e (3.9) e valutati per un'area della copertura pari a 267 m^2 (il valore approssimativo della Duke Smart Home a Durham, NC, USA, residenza universitaria oggetto dello studio di Pelak e Porporato) e a 133,5 m^2,

pari alla metà del valore precedente, per mostrare i diversi andamenti che la funzione può assumere. Le linee grigie considerano un volume di 7,95 m^3, ossia il volume dei serbatoi interni alla Smart Home, mentre le linee nere corrispondono ad una capacità di 19,2 m^3, pari al volume combinato dei serbatoi interni ed esterni che compongono il sistema RWH. I due grafici interni definiscono invece l'andamento del volume di accumulo normalizzato (c), valutato attraverso serie temporali campione di 100 giorni per ogni combinazione dell'area del tetto (A) e del volume del serbatoio (V).

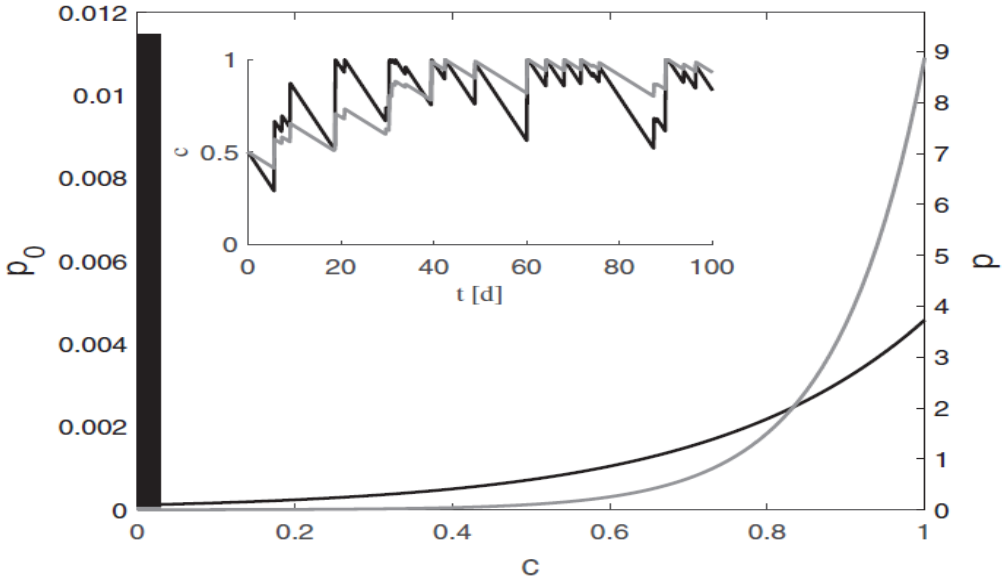

Figura 3.3: Funzione di Densità di Probabilità al variare del volume normalizzato nel serbatoio, con area della copertura pari a 267 m^2
[Fonte: Pelak e Porporato, 2016].

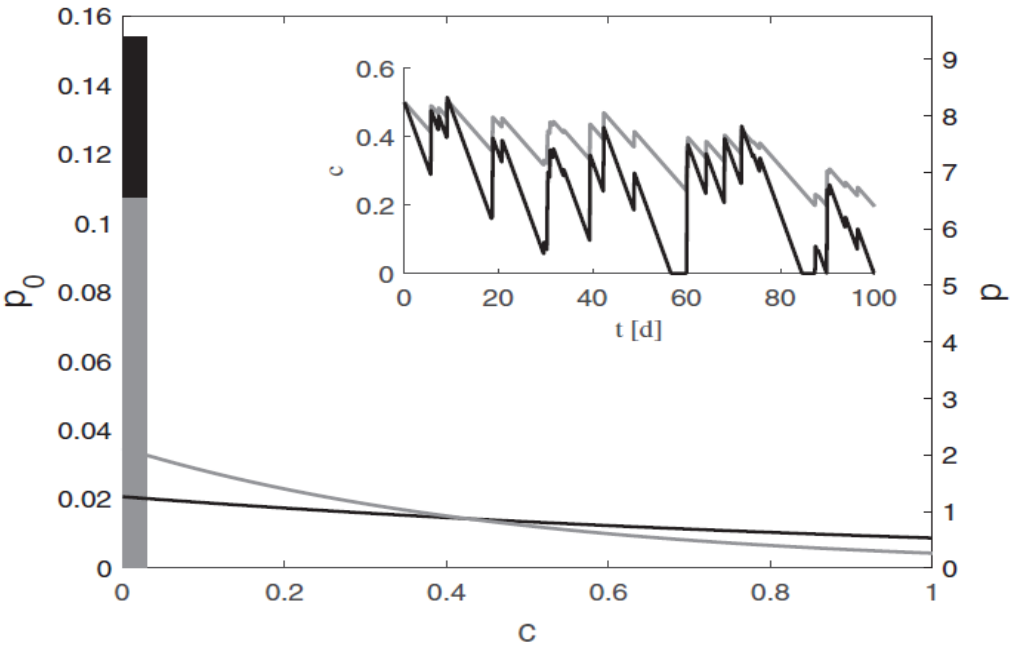

Figura 3.4: Funzione di Densità di Probabilità al variare del volume normalizzato nel serbatoio, con area della copertura pari a 133,5 m^2
[Fonte: Pelak e Porporato, 2016].

Il bilancio idrico a lungo termine consente di effettuare una ripartizione della quantità di acqua piovana stoccata all'interno del serbatoio nei due seguenti contributi:

$$\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle = \langle H \rangle + \langle Q \rangle, \tag{3.12}$$

dove $\langle H \rangle$ rappresenta la frazione di acqua piovana stoccata che è volta a soddisfare parte della domanda domestica giornaliera, mentre $\langle Q \rangle$ costituisce la componente di sfioro dalla cisterna.

Dividendo entrambi i membri dell'equazione (3.12) per il prodotto $(\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle)$, si perviene alla seguente formulazione in termini adimensionali:

$$1 = \frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle} + \frac{\langle Q \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle}. \tag{3.13}$$

Il primo addendo, ossia il tasso di perdite dal serbatoio per soddisfare la domanda idrica domestica $(\langle H \rangle)$, è a sua volta definito per mezzo dell'equazione (3.14):

$$\langle H \rangle = h \cdot (1 - p_0), \tag{3.14}$$

cioè è pari al prodotto che intercorre tra il tasso di domanda idrica (h) e la probabilità che il serbatoio sia riempito parzialmente o totalmente $(1 - p_0)$; quest'ultimo fattore costituisce a sua volta il complementare della probabilità di ricadere nella condizione di cisterna completamente vuota (p_0).

Combinando infine le equazioni (3.7) e (3.14), si perviene alla formulazione finale, che esprime il rendimento del sistema RWH:

$$\frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle} = D_c \cdot (1 - p_0). \tag{3.15}$$

La precedente espressione può essere visualizzata graficamente nel diagramma sottostante: combinando i valori relativi al volume adimensionale della cisterna (γ) e all'indice di domanda del serbatoio (D_c), è possibile determinare il rendimento di un generico sistema RWH, ossia la riduzione della domanda idrica dalla rete acquedottistica.

Il grafico seguente, ottenuto dagli studi effettuati sulla Duke Smart Home, rappresenta un efficace punto di riferimento per la valutazione dell'efficienza dei sistemi per la raccolta e l'utilizzo delle acque piovane.

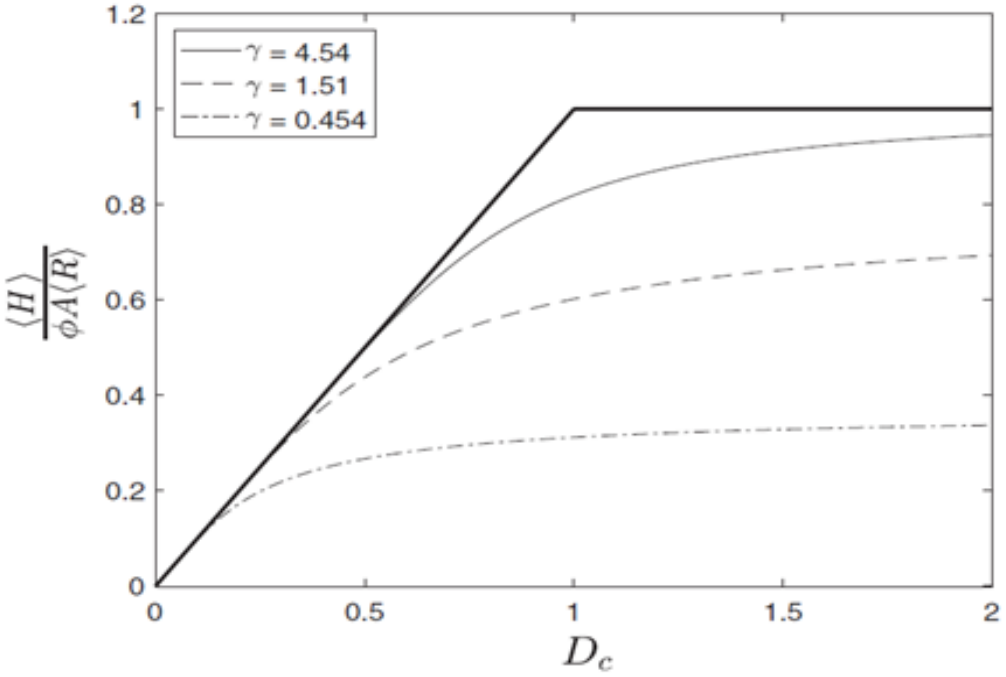

Figura 3.5: Andamento dell'efficienza del sistema RWH in funzione dell'indice di domanda del serbatoio (D_c), per diversi valori della variabile γ
[Fonte: Pelak e Porporato, 2016].

Dall'analisi del precedente diagramma si possono distinguere le due seguenti condizioni:

- se $0 \le D_c \le 1$, allora il tasso di domanda idrica (h) è minore rispetto al tasso di precipitazione che può essere immagazzinata nel serbatoio $(\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle)$, quindi la domanda idrica è completamente soddisfatta dalla cisterna;
- se invece $D_c > 1$, allora la massima domanda idrica che può essere soddisfatta dal serbatoio (H) è rappresentato dal volume di acqua stoccato al suo interno.

Le curve precedentemente diagrammate costituiscono il risultato degli studi effettuati da Pelak e Porporato sulla Duke Smart Home per diversi valori del volume adimensionale del serbatoio (γ): in particolare, la curva continua del grafico fa riferimento all'edificio in trattazione, caratterizzato dal valore maggiore della variabile γ $(\gamma = 4{,}54)$, mentre le due linee tratteggiate, prese in considerazione per illustrare i possibili andamenti che la curva può assumere, presentano rispetto al caso reale un valore di γ pari a 1/3 $(\gamma = 1{,}51)$ e a 1/10 $(\gamma = 0{,}454)$.

Prendendo come riferimento la condizione $\gamma = 1$, che definisce l'uguaglianza tra la capacità della cisterna e il volume di pioggia raccolta durante un evento meteorico medio, le tre curve consentono di giungere alle seguenti conclusioni:

- nel caso di serbatoi con capacità pari a circa il 45,4% del volume di pioggia caduta in un evento medio di precipitazione, ossia quando $\gamma = 0{,}454$, la domanda idrica soddisfatta dal serbatoio (H) raggiunge un valore massimo pari pressoché al 34% della portata di acqua piovana confluita al suo interno: tale valore si ottiene, osservando il diagramma in figura 3.5, quando l'indice di domanda del serbatoio (D_c) è pari a 2. Ne deriva che un volume limitato del serbatoio riduce notevolmente il rendimento del sistema RWH, in quanto gran parte della risorsa idrica potenzialmente captabile viene persa per sfioro;

- se invece il serbatoio presenta una capacità superiore del 51% rispetto al volume di pioggia che confluisce nello stesso durante un evento medio, cioè quando $\gamma = 1{,}51$, allora la cisterna sarà in grado di raccogliere completamente il volume di acqua piovana captata dal tetto: il rendimento del sistema RWH migliora quindi notevolmente, raggiungendo il valore massimo del 70% quando $D_c = 2$;

- quando infine $\gamma = 4{,}54$, ossia per capacità del serbatoio nettamente maggiori del volume di precipitazione di un evento meteorico medio, l'efficienza del sistema sarà prossima a quella massima, con valori superiori al 90% per $D_c = 2$, come nel caso dell'edificio oggetto di studio.

La spezzata che sovrasta le tre precedenti curve ha un significato fisico ben preciso, in quanto rappresenta il rendimento massimo verso cui tendono tutti i sistemi DRWH (Domestic RainWater Harvesting) caratterizzati da serbatoi di grande capacità rispetto al volume di acqua piovana confluente negli stessi $(\gamma \to \infty)$: essi saranno pertanto in grado di immagazzinare potenzialmente un volume infinito rispetto a quello defluente nella sezione di chiusura del tetto durante un evento medio di pioggia, garantendo quindi il soddisfacimento totale della domanda idrica dell'edificio e il contemporaneo annullamento degli sfiori defluenti verso la rete fognaria. Questa spezzata, che costituisce il caso degenere delle curve sottese dalla stessa, può essere a sua volta suddivisa nei seguenti intervalli:

- quando $0 \le D_c < 1$, si ha un andamento lineare, definito dalla retta bisettrice del primo quadrante; l'espressione analitica del rendimento limite è quella presentata di seguito:

$$\frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle} = \lim_{\gamma \to \infty} D_c \cdot \left(1 - \frac{1 - D_c}{e^{\gamma \left(\frac{1}{D_c} - 1 \right)} - D_c} \right) = D_c ; \qquad (3.16)$$

- quando $D_c > 1$, si ha invece un andamento costante, cioè il sistema è caratterizzato dal massimo rendimento, pari a 1; analiticamente, l'efficienza limite di questo secondo tratto della spezzata è valutata come segue:

$$\frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle} = \lim_{\gamma \to \infty} D_c \cdot \left(1 - \frac{1 - D_c}{e^{\gamma \left(\frac{1}{D_c} - 1 \right)} - D_c} \right) = 1 . \qquad (3.17)$$

- il caso particolare in cui $D_c = 1$, cioè il punto angoloso che costituisce il passaggio tra la legge lineare e quella uniforme del rendimento del sistema, esprime infine la condizione per cui tutta la pioggia caduta sulla copertura $(\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle)$ è stata convertita automaticamente nel volume necessario al soddisfacimento della domanda idrica dell'edificio (h).

Complessivamente, l'efficienza del sistema aumenta quanto più i due parametri adimensionali D_c e γ tendono verso valori elevati ($D_c \to 1, \gamma \to \infty$): sarà pertanto sufficiente, d'ora in avanti, fare affidamento sui valori assunti da queste due variabili in modo da stimare graficamente il rendimento del sistema RWH, ancora prima di averlo determinato numericamente.

Nella tabella seguente sono riportati i parametri impiegati da Pelak e Porporato per determinare l'efficienza del sistema RainWater Harvesting nella residenza universitaria di Durham, NC; in particolare, il volume del serbatoio (V) è disponibile sul sito web dell'edificio in questione, mentre l'area della copertura (A) può essere ricavata dalle planimetrie dell'immobile. La domanda idrica (h) è invece pari a 300 $l \cdot d^{-1}$, fa riferimento all'impiego delle acque meteoriche per garantire l'utilizzo del WC ed è relativa a 10 residenti, con un utilizzo giornaliero pari a 5 volte per persona e con 6 litri per ogni utilizzo; i dati di precipitazione nella cittadina di Durham, in termini sia di altezza media di pioggia (α) che di frequenza di pioggia (λ) sono stati infine ricavati da una precedente ricerca eseguita da Daly e Porporato nel 2006.

Parametro	*Simbolo*	*Unità di misura*	*Valore*
Area del tetto	A	m^2	267
Domanda idrica	h	$m^3 \cdot d^{-1}$	0,3
Vita utile del serbatoio	T	d	10˙950
Volume del serbatoio	V	m^3	7,95
Altezza media di pioggia	α	mm	8,2
Coefficiente di deflusso	ϕ	-	0,8
Frequenza di pioggia	λ	d^{-1}	0,31

Tabella 3.1: Parametri impiegati per determinare l'efficienza del sistema RWH [Fonte: Pelak e Porporato, 2016].

Si può quindi concludere che a partire dai dati precedentemente raccolti, relativi rispettivamente al serbatoio, alla superficie di captazione, alla precipitazione e al fabbisogno idrico dell'edificio, è possibile ricavare i valori dei due parametri adimensionali γ e D_c; è infine sufficiente impiegarli all'interno del diagramma in figura 3.5, che ha un valore universale, in modo da determinare il rendimento del sistema RWH in questione: quest'ultimo è infatti definito sull'ordinata del grafico sopraindicato in funzione dei due precedenti parametri.

3.2 Determinazione della capacità ottimale del serbatoio

Il presente paragrafo è dedicato alla determinazione di un'espressione analitica per effettuare il dimensionamento di un serbatoio per la raccolta delle acque piovane sulla base della minimizzazione dei costi totali: verranno quindi esaminate le singole componenti che definiscono il costo totale e si applicherà in seguito la relazione ottenuta ad un caso reale, relativo alla residenza universitaria Duke Smart Home nella cittadina di Durham nella Carolina del Nord. Per eseguire la valutazione economica del sistema RWH si prendono in considerazione i due seguenti contributi:

- ✓ Costi fissi G_f: sono comprensivi sia della costruzione che della manutenzione del serbatoio. Si può ragionevolmente assumere che tali costi aumentino all'aumentare del volume V della cisterna; d'ora in poi i costi di manutenzione non saranno citati in maniera esplicita, poiché possono essere incorporati nei costi fissi assumendo che siano indipendenti dal volume del serbatoio o che dipendano da esso in maniera analoga a quanto avviene per i costi di costruzione.

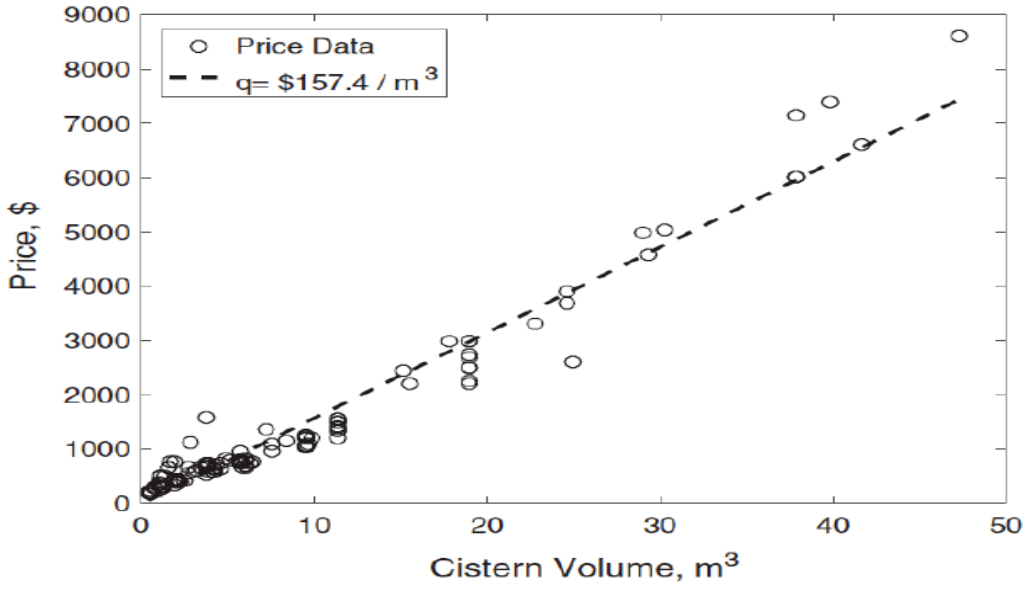

Figura 3.6: Costo dei serbatoi commerciali al variare del loro volume [Fonte: www.rainharvest.com].

La figura precedente riporta i costi di vari serbatoi, interrati e realizzati in materiale polimerico, in funzione del loro volume, suggerendo l'esistenza di una relazione lineare tra le due grandezze, anche se l'economia di scala è tale da produrre una deviazione di tale legge per volumi superiori a 30 m^3. A partire dalla figura 3.6 è stata elaborata la funzione di costo fisso, ottenuta tramite interpolazione lineare di un'ampia gamma di serbatoi disponibili in commercio e definita come:

$$G_f = q \cdot V \cdot \Theta(V), \tag{3.18}$$

con:

- $q\ \left[\$ \cdot (m^3)^{-1}\right]$: Costo unitario per capacità di stoccaggio; tale valore viene inteso graficamente come il coefficiente angolare della retta interpolante ed è pari a $157{,}4\ \$ \cdot (m^3)^{-1}$;
- $V\ \left[m^3\right]$: Volume del serbatoio, variabile da 0 fino a 50 m^3;
- $\Theta(V)\ [-]$: Heaviside Step Function; questa funzione a gradino è definita in modo tale che:

$$\Theta(V) = \begin{cases} 0 & \text{se } V = 0 \\ 1 & \text{se } V > 0. \end{cases} \tag{3.19}$$

✓ Costi distribuiti G_d : questa componente coincide con la fornitura di acqua dalla rete pubblica per riempire il serbatoio quando si verificano periodi di siccità prolungati. Il costo distribuito dipende da $r\ \left[\$ \cdot (m^3)^{-1}\right]$, ossia dal prezzo unitario dell'acqua, che varia con la posizione del sito in esame ed è funzione del tasso a cui l'acqua deve essere fornita dal sistema municipale. Relativamente al caso esaminato, il costo unitario per unità di volume mensilmente impiegato dall'utenza assume il seguente andamento a scaglioni, così come avviene per qualsiasi fornitura idrica negli Stati Uniti:

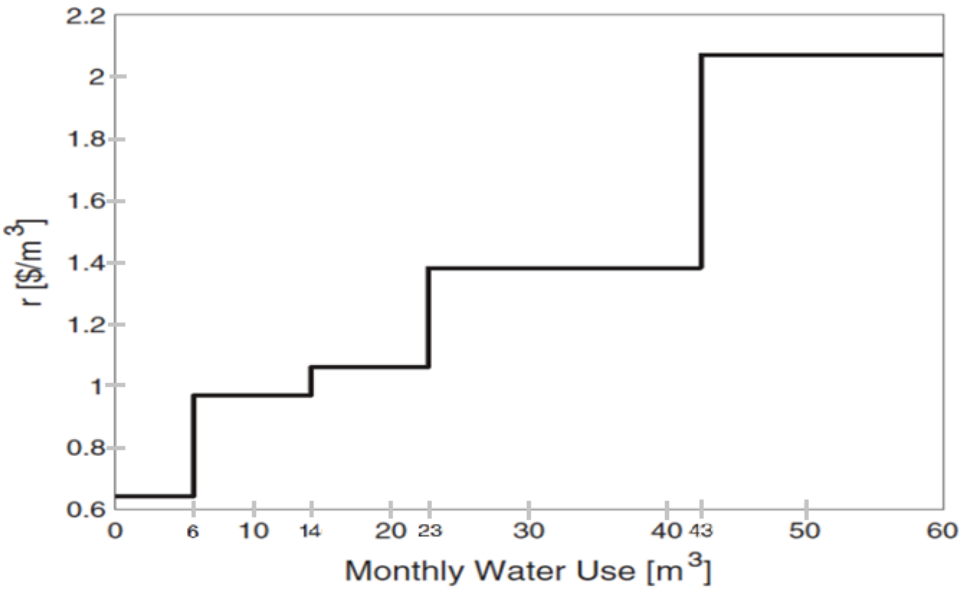

Figura 3.7: Costo unitario dell'acqua di rete in funzione dei consumi mensili [Fonte: www.durhamnc.gov].

Dal precedente grafico si può osservare che il sistema di fornitura idrica della città di Durham prevede cinque fasce tariffarie, di cui l'ultima si verifica in corrispondenza di un prelievo idrico pari a 43 m^3; occorre poi sottolineare che, una volta che un nuovo incremento viene raggiunto, il prezzo unitario si applica solo all'incremento e non al consumo idrico intero. Sulla base della struttura tariffaria mensile precedentemente raffigurata, il costo unitario dell'acqua garantita dalla rete acquedottistica municipale può essere calcolato per mezzo della seguente equazione proposta da Pelak e Porporato:

$$r = \frac{1}{30h \cdot p_0} \sum_{n=1}^{n=k} r_n \cdot \left(v_n - v_{v-1}\right), \tag{3.20}$$

con:

- $h \left[m^3 \cdot d^{-1}\right]$: tasso di domanda idrica, espresso come prodotto tra il numero di residenti, il numero di utilizzi giornalieri pro capite del WC e il volume di acqua consumato ad ogni utilizzo;
- $p_0 \left[-\right]$: probabilità, espressa dalla relazione (3.9), che il volume di accumulo normalizzato sia nullo $(c = 0)$, cioè che il serbatoio sia vuoto;
- $v_k = 30h \cdot p_0 \left[m^3 \cdot mese^{-1}\right]$: volume idrico mensile richiesto alla rete pubblica;
- $n \left[-\right]$: n-esimo gradino di prezzo;
- $k \left[-\right]$: massimo gradino di prezzo raggiunto dal caso analizzato;
- $r_n \left[\$ \cdot \left(m^3\right)^{-1}\right]$: prezzo unitario mensile relativo all'n-esimo gradino;
- $v_n \left[m^3\right]$: volume idrico mensile massimo a cui termina l'n-esimo gradino di prezzo;
- $v_{n-1} \left[m^3\right]$: volume idrico mensile minimo a cui inizia l'n-esimo gradino di prezzo.

Viene poi indicata con $T \left[d\right]$ la vita utile del sistema RWH, ossia la sua durata prevista, e si assume che il serbatoio operi sin dall'inizio dell'analisi in condizioni stazionarie, in modo tale da trascurare il periodo transitorio necessario al raggiungimento dello stato stazionario.
La precedente semplificazione consente quindi di esprimere il costo medio distribuito come il prodotto di questi due termini:

- $r \left[\$ \cdot \left(m^3\right)^{-1}\right]$: costo unitario dell'acqua richiesto alla rete pubblica;
- $\left\langle H_m \right\rangle \cdot T = h \cdot p_0 \cdot T \left[m^3\right]$: domanda idrica totale richiesta alla rete municipale durante tutta la vita utile del serbatoio, dove il termine $\left\langle H_m \right\rangle$ esprime il valore medio della domanda idrica giornaliera richiesta alla rete pubblica.

L'espressione generale dei costi distribuiti è quindi la seguente:

$$G_d = r \cdot h \cdot T \cdot p_0 . \tag{3.21}$$

Una volta note le espressioni dei costi fissi e dei costi distribuiti, il costo totale può essere calcolato come la loro somma, sulla base di quanto riportato nell'equazione (3.22):

$$G = G_f + G_d = q \cdot V \cdot \Theta(V) + r \cdot h \cdot T \cdot p_0 . \tag{3.22}$$

Il grafico seguente raffigura le funzioni di costo fisso, distribuito e totale in funzione del volume V della cisterna, per capacità comprese tra 0 m^3 e 8 m^3:

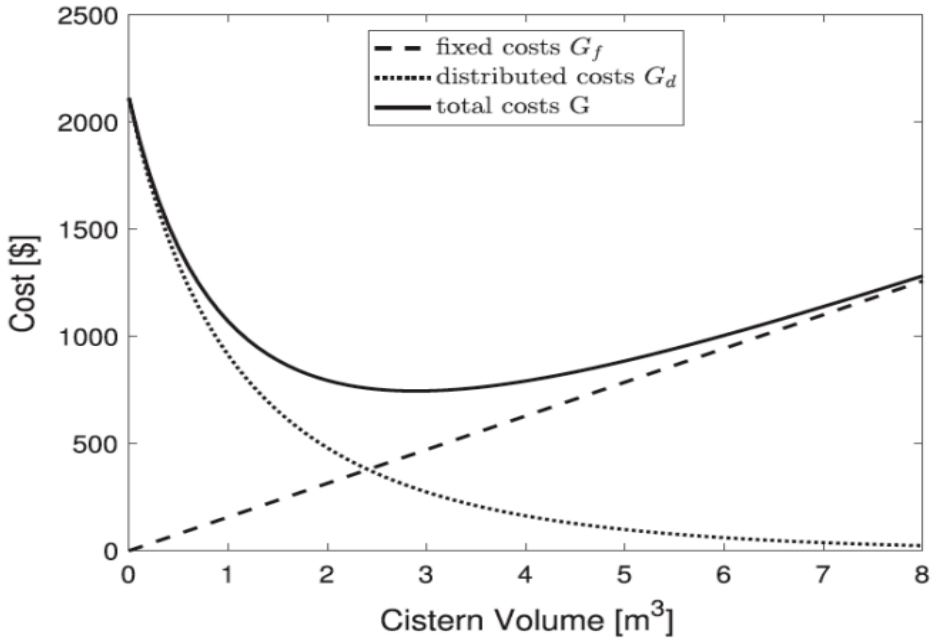

Figura 3.8: Costo fisso, distribuito e totale in funzione del volume del serbatoio [Fonte: Pelak e Porporato, 2016].

Dal diagramma precedente si può notare come i costi fissi siano direttamente proporzionali al volume V del serbatoio, mentre i costi distribuiti presentino invece un andamento opposto a causa della dipendenza dell'atomo di probabilità p_0 da V, determinando quindi un minimo della funzione costo totale (G). Il volume ottimale della cisterna (V^*), ossia il volume caratterizzato dal costo totale minimo, si ottiene derivando la funzione costo totale G rispetto al volume V della cisterna, ottenendo l'equazione sotto riportata:

$$V^* = \frac{\alpha\phi A h}{\alpha\phi A\lambda - h} \cdot \ln\left\{ \frac{h}{\alpha\phi A\lambda} - \frac{hrT}{2q} \cdot \left(1 - \frac{h}{\alpha\phi A\lambda}\right) \cdot \left(\frac{\alpha\phi A\lambda - h}{\alpha\phi A\lambda}\right) + \frac{\alpha\phi A\lambda - h}{2\alpha^2\phi^2 A^2\lambda q} \cdot \sqrt{4\alpha\phi A h q r T + \left[rT(\alpha\phi A\lambda - h)\right]^2} \right\}. \tag{3.23}$$

E' importante osservare che il volume definito dalla precedente equazione è negativo per frequenze di precipitazione (λ) inferiori al valore critico $\lambda_c = \frac{q}{r \cdot T}$: per queste frequenze, il costo incrementale per unità di volume del serbatoio, definito analiticamente dalla derivata dG/dV, non presenta un minimo per un determinato valore del volume V, pertanto il sistema RWH non sarebbe finanziariamente attuabile per tutta la sua vita utile (T) e il volume ottimale (V^*) risulterebbe quindi pari a 0. In generale, la frequenza di pioggia critica (λ_c) può presentare valori estremamente instabili a seconda del contesto esaminato, in quanto è funzione non solo della vita utile della cisterna (T) e del suo costo unitario (q) ma anche del costo unitario dell'acqua garantita dalla rete acquedottistica (r): quest'ultimo parametro è suscettibile di variazioni notevoli, definite principalmente dalla disponibilità della risorsa idrica. L'intervallo di frequenze di pioggia per il quale è garantita la resa economica di un sistema DRWH mostra la massima estensione quando la frequenza di pioggia critica (λ_c) presenta i valori più bassi: questa condizione può essere ottenuta massimizzando la vita utile del serbatoio (T) e il costo unitario dell'acqua garantita dalla rete pubblica (r) e minimizzando contemporaneamente il costo unitario della cisterna (q).

Nel caso particolare in cui l'indice di domanda del serbatoio (D_c), precedentemente definito nell'equazione (3.7), risulti pari a 1, la precedente espressione si semplifica notevolmente ed il volume ottimale assume pertanto la seguente forma:

$$V^* = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \phi \cdot A \cdot r \cdot h \cdot T}{q}} - \alpha \cdot \phi \cdot A . \qquad (3.24)$$

L'espressione (3.23) indica che la dimensione ottimale del serbatoio è funzione di 8 parametri, i quali possono essere raggruppati nelle seguenti 5 categorie:

- parametri climatici, definiti attraverso l'altezza dell'evento medio di pioggia (α) e la frequenza di precipitazione (λ);
- superficie di captazione, valutata mediante il coefficiente di deflusso (ϕ) e l'area (A) della copertura proiettata sul piano orizzontale;
- domanda idrica, definita per mezzo della costante h;
- costo idrico unitario (r) richiesto alla rete acquedottistica;
- vita utile (T) e costo unitario per capacità di stoccaggio (q), caratteristici del sistema RWH.

Come diretta conseguenza dell'ipotesi di stato stazionario, se un evento climatico estremo, come ad esempio un periodo di siccità, dovesse verificarsi durante la vita utile del sistema RWH, il costo totale non sarebbe quello previsto dall'equazione (3.22): per quantificare l'impatto economico di un tale

evento, devono essere determinati sia i benefici finanziari previsti, derivanti dalla costruzione del serbatoio, che l'ammontare massimo di denaro che si può perdere con un tale investimento.

Il beneficio finanziario previsto $\langle B \rangle$ può essere quantificato come la differenza, valutata con riferimento alla vita utile della cisterna, che intercorre tra il costo necessario per soddisfare la domanda idrica domestica ricorrendo esclusivamente alla rete pubblica e il costo totale della cisterna, come espresso nell'equazione sottostante:

$$\langle B \rangle = r \cdot \langle H \rangle \cdot T - G(V^*) = r \cdot h \cdot T \cdot (1 - p_0) - q \cdot V^*. \tag{3.25}$$

La massima perdita economica $L_{\max}$, che corrisponde alla condizione estrema caratterizzata dalla totale assenza di precipitazioni raccolte durante la vita utile del serbatoio, viene invece calcolata come la somma tra il costo di costruzione della cisterna, comprensivo delle spese necessarie per garantire la sua periodica manutenzione, e il costo da sostenere per soddisfare completamente la domanda idrica ricorrendo solamente all'acquedotto:

$$L_{\max} = q \cdot V^* + r \cdot h \cdot T. \tag{3.26}$$

Occorre notare che in questa espressione, relativa alla massima perdita economica, si è considerata la condizione peggiore, in quanto l'atomo di probabilità p_0 che il serbatoio sia completamente vuoto assume valore pari a 1. Le due precedenti equazioni risultano di fondamentale importanza, in quanto i valori relativi al beneficio finanziario previsto $(\langle B \rangle)$ e alla massima perdita economica $(L_{\max})$ costituiscono strumenti decisionali per ottenere informazioni sul rischio finanziario e sul potenziale profitto derivante dall'investimento in un sistema RWH.

Bisogna infine osservare che, in aggiunta alla capacità di ridurre la dipendenza di un edificio dalla fornitura idrica pubblica, la raccolta delle acque piovane può determinare un altro importante vantaggio, ossia la riduzione del deflusso. Molti comuni degli Stati Uniti, compresa la stessa città di Durham, impongono infatti una tassa sull'acqua piovana, basata parzialmente o totalmente sull'estensione della superficie impermeabile di una proprietà: i sistemi RWH determinano un beneficio economico ai proprietari dell'immobile, soprattutto nei contesti urbani, attraverso una riduzione delle tasse sull'acqua piovana, in quanto rimuovono dall'area totale della superficie impermeabile della proprietà una frazione considerevole, costituita dalla superficie impermeabile della copertura. Questo farà sì che in futuro molti comuni saranno disposti a considerare l'installazione dei sistemi RWH in alternativa all'imposizione in queste tasse.

3.3 Esempi applicativi

Il presente paragrafo è dedicato all'elaborazione dei risultati numerici relativi allo studio di Pelak e Porporato del 2016, in termini di rendimento del sistema RWH installato per diverse casistiche.
La prima analisi è relativa alla residenza universitaria di Durham, per la quale sono stati presi in considerazione due esempi, rappresentati rispettivamente dalla Duke Smart Home e da un edificio analogo con area della proiezione orizzontale della copertura dimezzata rispetto al precedente; nella tabella successiva sono elencati i principali parametri utili per eseguire l'analisi:

Parametro	*Simbolo*	*Unità di misura*	*Valore*
Area del tetto, Smart Home reale	A	m^2	267
Area del tetto, Smart Home fittizia	A	m^2	133,5
Domanda idrica	h	$m^3 \cdot d^{-1}$	0,3
Volume del serbatoio	V	m^3	7,95
Altezza media di pioggia	α	mm	8,2
Coefficiente di deflusso	ϕ	-	0,8
Frequenza di pioggia	λ	d^{-1}	0,31

Tabella 3.2: Grandezze impiegate per il calcolo del rendimento dei 2 sistemi RWH [Fonte: Pelak e Porporato, 2016].

Tendendo presente che la domanda idrica giornaliera (h), pari a 300 litri in entrambi i casi in quanto il numero di utenti resta invariato, è stata calcolata per mezzo della formula seguente:

$$h\left[l \cdot d^{-1}\right] = n^o residenti[-] \cdot \frac{utilizzi}{giorno}\left[d^{-1}\right] \cdot \frac{litri}{utilizzo}[l], \qquad (3.27)$$

e che il tasso di precipitazione medio $\langle R \rangle$, valutato con l'espressione (3.2), fornisce in entrambi i casi un valore pari ad $\langle R \rangle = 2{,}542 \frac{mm}{d}$, l'applicazione del teorema di Buckingham ha ridotto l'analisi alla valutazione dei seguenti tre parametri adimensionali:

Parametro	*Significato fisico*	$A = 267m^2$	$A = 133{,}5m^2$
γ	Volume normalizzato del serbatoio	4,539	9,078
D_c	Indice di domanda del serbatoio	0,553	1,105
p_0	Probabilità di serbatoio vuoto	0,011	0,154

Tabella 3.3: Parametri adimensionali per il calcolo del rendimento dei 2 sistemi RWH.

Si sono pertanto ricavati i due seguenti valori dell'efficienza dei sistemi, di seguito diagrammati:

$$\left(\frac{\langle H\rangle}{\phi\cdot A\cdot\langle R\rangle}\right)_{SMART\ \ HOME\ \ REALE}=0{,}5462;\qquad \left(\frac{\langle H\rangle}{\phi\cdot A\cdot\langle R\rangle}\right)_{SMART\ \ HOME\ \ FITTIZIA}=0{,}9351.$$

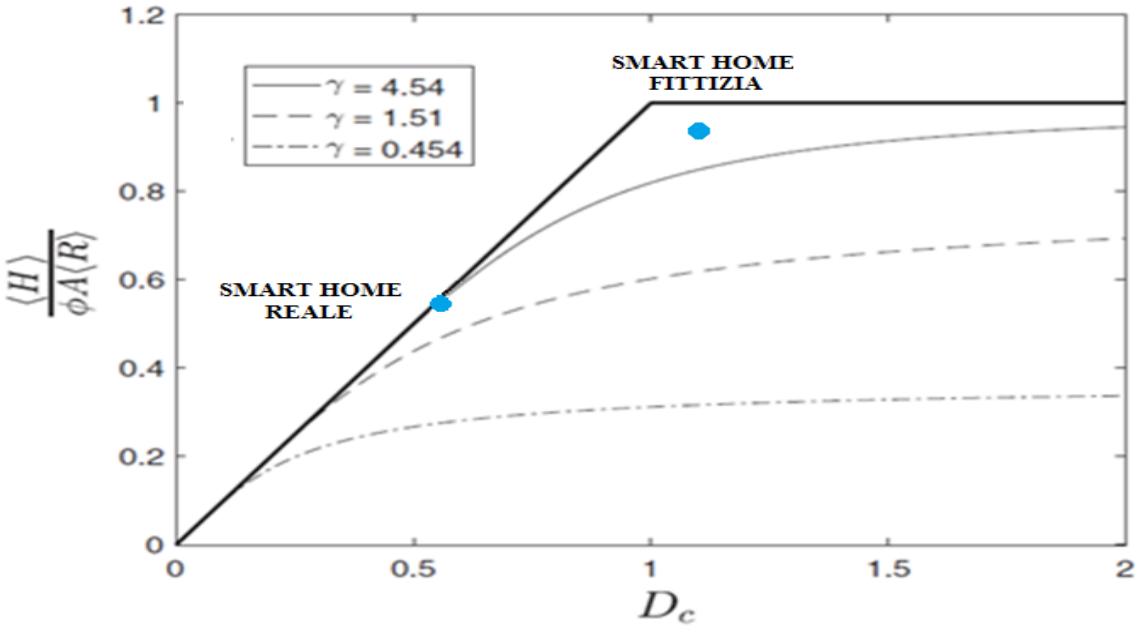

Figura 3.9: Rendimenti dei sistemi RWH della residenza universitaria reale e fittizia.

Dai precedenti risultati si può riscontrare che il rendimento è particolarmente elevato per il caso ipotetico, in quanto la Smart Home fittizia, avendo una copertura di estensione dimezzata rispetto al caso reale, capterà di conseguenza un minore volume di pioggia: questo fa sì che gli sfiori dalla cisterna, che costituiscono il complementare dell'efficienza, siano in quest'ultima casistica inferiori al 7% degli afflussi totali $(1-0{,}9351=0{,}0649)$, determinando una cisterna decisamente più idonea in termini di ridotto volume defluente nella rete fognaria. La residenza universitaria presenta invece un rendimento particolarmente contenuto: il valore 0,5462 fa sì che gli sfiori dal serbatoio siano superiori al 45% dell'afflusso complessivo $(1-0{,}5462=0{,}4538)$ nel corso dell'anno, determinando sprechi notevoli. In generale occorre progettare un sistema RWH in modo che la sua efficienza, espressa analiticamente dall'equazione 2.51, sia il più possibile prossima al valore unitario: essa, abbinata ad un corretto dimensionamento del serbatoio, garantisce infatti di ottenere un ottimo compromesso tra il soddisfacimento della domanda idrica e la riduzione degli sfiori defluenti nella fognatura.

Un'ulteriore applicazione di questo modello di bilancio idrico prende in considerazione nuovamente la cittadina americana di Durham, valutando il rendimento di ipotetici sistemi DRWH installati rispettivamente in una villa bifamiliare e in un condominio, in modo da poterli confrontare direttamente con i risultati precedentemente ottenuti per la residenza universitaria. Poiché la presente

analisi fa nuovamente riferimento alla stessa città già considerata nella precedente applicazione, i volumi dei serbatoi sono ottenuti tramite una proporzione che tiene conto dell'area della copertura; prendendo come valore di partenza l'estensione del tetto della Duke Smart Home, si utilizza la seguente proporzione:

$$A_{TETTO\ 1} : V_{SERBATOIO\ 1} = A_{TETTO\ 2} : V_{SERBATOIO\ 2}, \tag{3.28}$$

ottenendo quindi le due seguenti capacità delle cisterne:

- Villa bifamiliare: $267[m^2] : 7{,}95[m^3] = 110[m^2] : V[m^3] \quad \Rightarrow \quad V = 3{,}275 m^3$;
- Condominio: $267[m^2] : 7{,}95[m^3] = 600[m^2] : V[m^3] \quad \Rightarrow \quad V = 17{,}865 m^3$.

Siccome i due valori ottenuti fanno riferimento a serbatoi che non sono disponibili in commercio, sono state selezionate le cisterne con la capacità più prossima, entrambe fornite dall'azienda americana National Storage Tank:

- Villa bifamiliare: $V = 3{,}275 m^3 \quad \Rightarrow \quad V_{COMMERCIALE} = 3{,}274 m^3 (= 865\ \ galloni)$;
- Condominio: $V = 17{,}865 m^3 \quad \Rightarrow \quad V_{COMMERCIALE} = 18{,}927 m^3 (= 5000\ \ galloni)$.

E' ora possibile, ricorrendo alle formule (3.6), (3.7) e (3.9), calcolare i tre parametri adimensionali necessari per valutare l'efficienza dei sistemi DRWH; nella seguente tabella sono riassunti i risultati ottenuti:

Parametro	***Significato fisico***	***Villa Durham***	***Condominio Durham***
γ	Volume normalizzato del serbatoio	4,033	4,274
D_c	Indice di domanda del serbatoio	0,834	0,983
p_0	Probabilità di serbatoio vuoto	0,119	0,182

Tabella 3.4: Parametri adimensionali per il calcolo dell'efficienza dei sistemi.

Operando infine come già visto nei precedenti casi, si ottengono i rendimenti dei due sistemi RWH:

$$\left(\frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle}\right)_{VILLA\ DURHAM} = 0{,}7351; \qquad \left(\frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle}\right)_{CONDOMINIO\ DURHAM} = 0{,}8049.$$

Il diagramma seguente permette la visualizzazione dei due valori dell'efficienza:

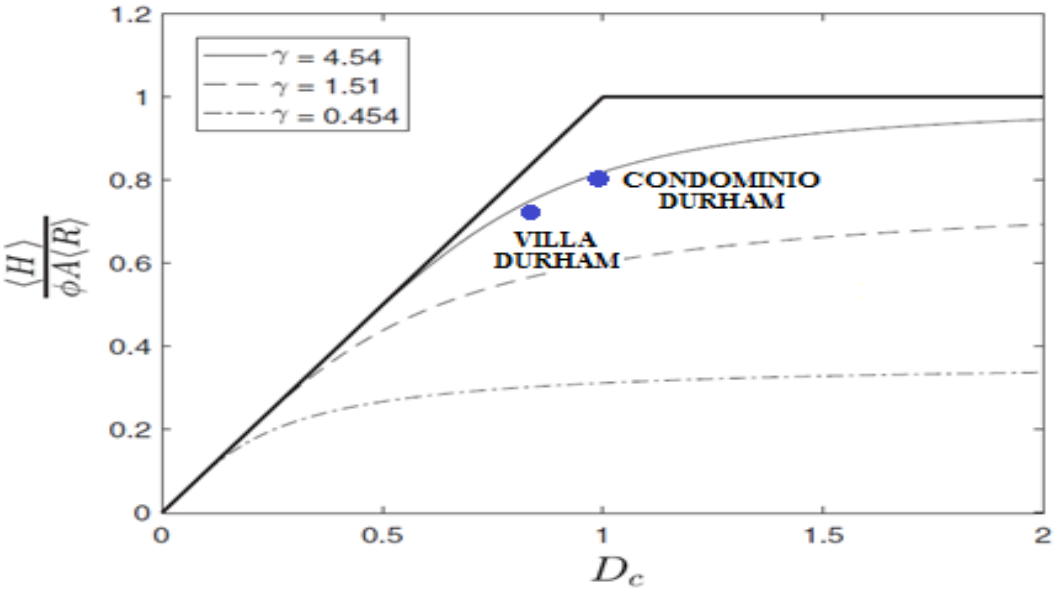

Figura 3.10: Rendimenti dei due sistemi RWH installati per la villa e il condominio.

I risultati sono particolarmente significativi, poiché la maggiore efficienza si riscontra per il sistema RWH installato nel condominio piuttosto che per la villa. Inoltre, il rendimento dei sistemi installati nei due edifici residenziali di Durham è superiore a quello del sistema analogo relativo alla residenza universitaria Duke Smart Home: questo risultato è da attribuire al maggiore equilibrio che sussiste tra il volume della cisterna, l'area della superficie di captazione, il numero di residenti e il regime pluviometrico della regione di Durham. Al tempo stesso, l'efficienza dei sistemi RWH installati per i due edifici residenziali è minore di quella ottenuta per la Smart Home fittizia, ossia con estensione della copertura pari alla metà di quella della residenza universitaria reale: ciò dimostra come, a parità di regime pluviometrico, il principale parametro che influenza il rendimento del sistema è l'area della copertura. Si denota infine che, seppure l'efficienza raggiunga livelli soddisfacenti sia per la villa che per il condominio, è possibile aumentare le dimensioni dei serbatoi, in modo da ridurre gli sfiori e aumentare conseguentemente il rendimento del sistema.

3.4 Tabelle riassuntive del modello di Pelak e Porporato (2016)

I parametri da implementare nel modello per valutare il rendimento del sistema sono i seguenti:

Simbolo	*Significato fisico*	*Unità di misura*
V	Volume della cisterna	$[m^3]$
V_{H_2O}	Volume di acqua stoccato nella cisterna	$[m^3]$
ϕ	Coefficiente di deflusso della copertura	$[-]$
A	Area della proiezione orizzontale della copertura	$[m^2]$
α	Altezza dell'evento medio di pioggia	$[mm]$
λ	Frequenza di precipitazione	$[d^{-1}]$
h	Tasso di domanda idrica (valore costante)	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
Q	Tasso di perdite dovuto agli sfiori	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
Θ	Heaviside step function	$[-]$

Tabella 3.5: Input del modello di Pelak e Porporato (2016).

Le precedenti grandezze devono essere elaborate come indicato nel paragrafo 3.1, in modo da ricavare i seguenti coefficienti intermedi:

Simbolo	*Significato fisico*	*Unità di misura*
γ	Volume normalizzato del serbatoio	$[-]$
D_c	Indice di domanda del serbatoio	$[-]$
p_0	Probabilità di serbatoio vuoto	$[-]$

Tabella 3.6: Parametri adimensionali per calcolare il rendimento di un sistema RWH.

I tre precedenti parametri adimensionali permettono di determinare l'efficienza del sistema sia in forma analitica, tramite l'impiego dell'equazione 3.15, che in forma grafica, come raffigurato nel diagramma 3.5.

Dal punto di vista economico, è invece necessario l'utilizzo dei seguenti parametri:

Simbolo	***Significato fisico***	***Unità di misura***
V	Volume della cisterna	$[m^3]$
T	Vita utile del sistema RWH	$[d]$
ϕ	Coefficiente di deflusso della copertura	$[-]$
A	Area della proiezione orizzontale della copertura	$[m^2]$
α	Altezza dell'evento medio di pioggia	$[mm]$
λ	Frequenza di precipitazione	$[d^{-1}]$
h	Tasso di domanda idrica (valore costante)	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
q	Costo unitario della cisterna per capacità di stoccaggio	$[\$ \cdot (m^3)^{-1}]$
r_n	Costo unitario mensile per l'n-esima fascia di consumo da acquedotto	$[\$ \cdot (m^3)^{-1}]$
$(v_n - v_{n-1})$	Volume mensile prelevato da acquedotto a cui corrisponde l'n-esimo gradino di prezzo	$[m^3]$

Tabella 3.7: Input per la valutazione dell'aspetto economico.

Le precedenti grandezze vengono impiegate, sulla base delle indicazioni riportate nel paragrafo 3.2, per determinare il costo fisso (G_f) e quello distribuito (G_d) del sistema; essi vengono poi sommati per ricavare il costo totale (C) che, derivato rispetto alla capacità della cisterna (V), fornisce il volume ottimale (V^*) del sistema RWH, cioè quello caratterizzato dai costi totali minimi.

4. Modello di bilancio idrico proposto da Tsihrintzis et al. (2013-2017)

Il presente modello considera un altro sottocaso del bilancio idrico a scala di edificio, in quanto analizza il bilancio di massa dell'acqua stoccata in una cisterna facente parte di un sistema RainWater Harvesting per la raccolta delle acque piovane, destinata a soddisfare la domanda idrica non potabile: tale metodo può pertanto consentire, oltre che il dimensionamento del sistema, anche la valutazione della sua efficienza, in alternativa al precedente modello elaborato nel 2016 da Pelak e Porporato.

L'area di studio è rappresentata dall'isola di Kimolos, che appartiene all'arcipelago delle isole Cicladi nel mar Egeo in Grecia: l'isola è da sempre afflitta da un problema fisiologico di scarsità idrica. La popolazione residente ammonta a 910 abitanti, che aumentano dell'ordine del 400-500% nei mesi estivi come diretta conseguenza del turismo; poiché la zona soffre di un grave deficit idrico e da una contestuale assenza di risorse idriche alternative, come ad esempio le acque di falda, l'isola è stata scelta per valutare l'affidabilità di un sistema per la raccolta delle acque meteoriche, in modo da far fronte alla domanda idrica per l'utilizzo del WC e della lavatrice.
La scarsità d'acqua a Kimolos è dovuta ad una serie di fattori, quali le condizioni climatiche, la struttura geologica e la superficie limitata dell'isola, pari a 37,43 km^2 , che non consentono l'esistenza di falde acquifere estese: la domanda idrica è quindi garantita dal trasporto di acqua via nave dalla città di Lavrio in Attica, determinando un costo significativo allo Stato, pari a 12 € per ogni metro cubo trasportato; in aggiunta, i ritardi nei rifornimenti dovuti alle condizioni meteorologiche avverse, determinano diversi periodi di carenza idrica, specie nei mesi estivi. Questi motivi rendono necessario analizzare la condizione di Kimolos, per sperimentare come un sistema di stoccaggio delle acque meteoriche possa risolvere o almeno minimizzare il problema del deficit idrico.

Figura 4.1: Posizione geografica dell'area di studio
[Fonte: Tsihrintzis e Baltas (2013, 2014), Londra (2015, 2017)].

Poiché Kimolos non possiede una stazione meteorologica, i dati giornalieri di pioggia nell'arco temporale 1990-2012 sono stati ottenuti dalla stazione situata nell'adiacente isola di Milos, che risulta essere la più vicina alla zona di analisi in quanto la distanza tra le due isole è pari a circa 2,5 km: le informazioni raccolte comprendono i dati giornalieri di pioggia per un periodo pari a 23 anni e possono essere considerati idonei per eseguire il dimensionamento delle cisterne per la raccolta delle acque meteoriche. Le elaborazioni dei dati hanno fornito un valore medio di altezza annua di pioggia pari a 383 mm, mentre il numero totale di giorni siccitosi, ossia quelli caratterizzati da un'altezza di pioggia inferiore ad 1 mm, è pari a 7˙518 nel periodo 1990-2012: le precedenti informazioni indicano in maniera inequivocabile l'esistenza di un regime pluviometrico decisamente limitato.

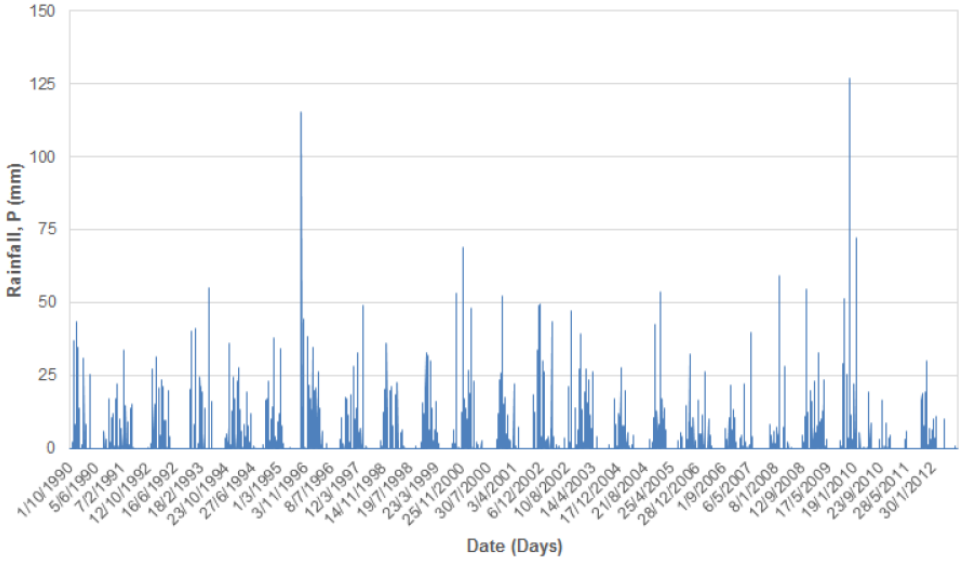

Figura 4.2: Serie storica delle piogge rilevate dalla stazione meteorologica di Milos [Fonte: Tsihrintzis e Baltas (2013, 2014), Londra (2015, 2017)].

4.1 Metodologia impiegata

Il modello di bilancio idrico, su scala temporale giornaliera, del serbatoio per la raccolta delle acque meteoriche è esplicitato analiticamente dalla seguente equazione:

$$S(t) = S(t-1) + R(t) - D(t), \tag{4.1}$$

dove $S(t)\left[m^3\right]$ indica il volume stoccato al termine del giorno considerato, mentre $S(t-1)\left[m^3\right]$ è il volume raccolto all'inizio del giorno stesso ed è tale da assumere tutti i possibili valori compresi nell'intervallo chiuso e limitato $\left[0; V_{TANK}\right]$, in cui $V_{TANK}\left[m^3\right]$ esprime la capacità della cisterna; $R(t)$ e $D(t)$ rappresentano infine il volume di acqua piovana che viene giornalmente immagazzinata e la domanda idrica giornaliera.

I precedenti termini possono essere modellati come segue:

- ✓ Il volume delle acque meteoriche che entrano quotidianamente nel serbatoio è calcolato come indicato nell'equazione (4.2):

$$R(t) = 10^{-3} \cdot C \cdot A \cdot P_{eff}(t), \tag{4.2}$$

con:

- $C\,[-]$: coefficiente di deflusso;
- $A\,[m^2]$: area di raccolta delle acque piovane;
- $P_{eff}(t)\,[mm]$: altezza giornaliera di pioggia efficace.

In questo studio, il coefficiente di deflusso C è pari a 0,9, mentre l'altezza di pioggia giornaliera efficace $P_{eff}(t)$ è pari alla differenza che intercorre tra l'altezza complessiva di precipitazione e le acque di prima pioggia. Facendo riferimento ai suggerimenti proposti da Yaziz nel 1989 per migliorare la qualità delle acque tramite la separazione di materiale estraneo come polvere e foglie accumulati sulla superficie di copertura, le acque di prima pioggia sono considerate di altezza pari a 0,33 mm; la pioggia efficace viene quindi calcolata come:

$$P_{eff}(t) = P(t) - 0{,}33, \tag{4.3}$$

con:

- $P(t)\,[mm]$: altezza giornaliera di precipitazione.

- ✓ La domanda idrica dell'edificio è invece valutata per mezzo dell'espressione (4.4):

$$D(t) = 10^{-3} \cdot N_{cap} \cdot q \cdot \left(\frac{p}{100}\right), \tag{4.4}$$

con:

- $N_{cap}[p]$: numero di residenti dell'edificio;
- $q\,[l \cdot p^{-1}]$: consumo idrico medio giornaliero pro capite, che in Grecia assume valori compresi tra 120 e 180 litri;
- $p\,[\%]$: percentuale del consumo idrico giornaliero soddisfatto dalla cisterna. Il massimo valore di p è funzione di una serie di variabili, in particolare la precipitazione media annua, l'area della superficie di raccolta delle acque, il numero di residenti e la tipologia di utilizzo delle acque stoccate.

Nello studio di Tsihrintzis et al. (2013-2017), la domanda idrica per usi non potabili di un'abitazione con 4 residenti è stata determinata assumendo un consumo medio giornaliero pro capite pari rispettivamente a $q = 120\ l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$ e $q = 150\ l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$, con percentuale di consumo soddisfatta dal serbatoio pari a $p = 35\%$: questo valore corrisponde all'utilizzo combinato del WC $(p_1 = 30\%)$ e della lavatrice $(p_2 = 5\%)$. I dati precedentemente forniti determinano un valore della domanda idrica giornaliera per i due casi pari a $D(t) = 0{,}168\ m^3 \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$ e $D(t) = 0{,}210\ m^3 \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$.

Il volume di acqua piovana immagazzinato giornalmente viene pertanto calcolato come:

$$S(t) = S(t-1) + 10^{-3} \cdot \left[C \cdot A \cdot P_{eff}(t) - N_{cap} \cdot q \cdot \left(\frac{p}{100} \right) \right], \tag{4.5}$$

dove la differenza tra i volumi in ingresso e in uscita è valutata, sulla base delle equazioni (4.2) e (4.4), come segue:

$$\Delta S(t) = 10^3 \cdot \left[C \cdot A \cdot P_{eff}(t) - N_{cap} \cdot q \cdot \left(\frac{p}{100} \right) \right]. \tag{4.6}$$

Lo schema sottostante definisce, con riferimento alla scala temporale giornaliera, la rappresentazione grafica del bilancio idrico del serbatoio per lo stoccaggio delle acque piovane:

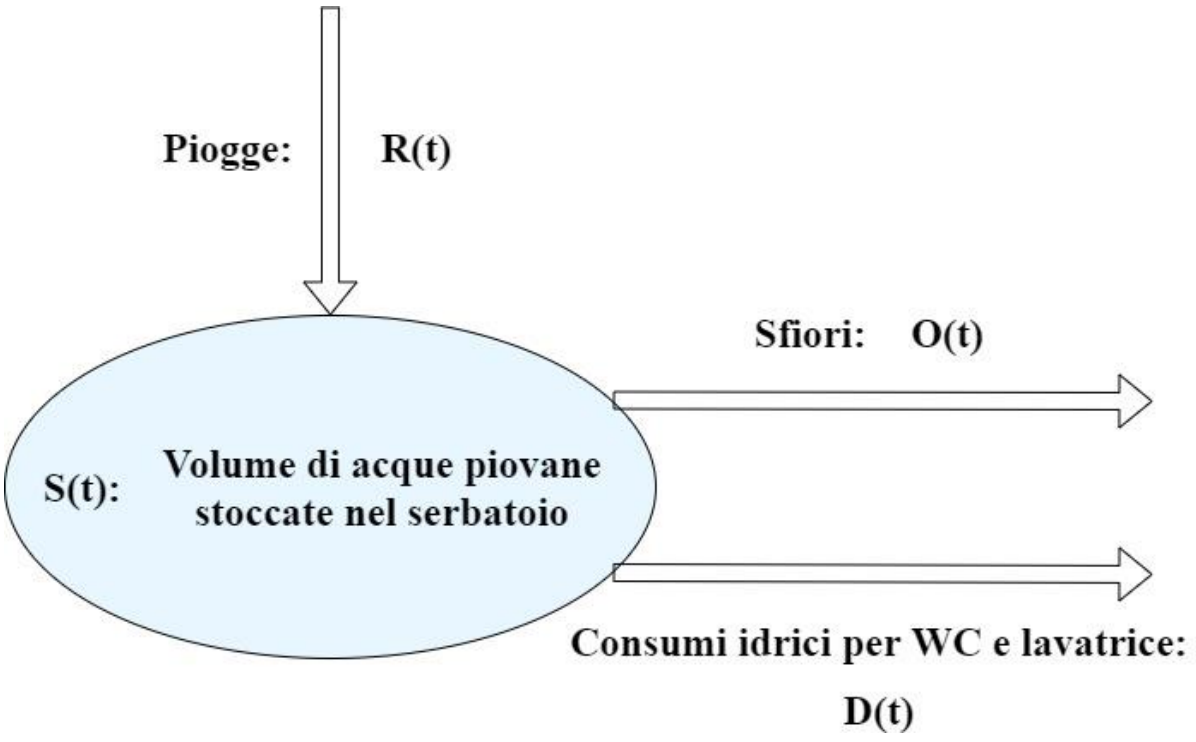

Figura 4.3: Schema del bilancio idrico del serbatoio per la raccolta delle acque piovane.

Per mezzo della precedente espressione, l'equazione (4.5) può essere riscritta come:

$$S(t) = S(t-1) + \Delta S(t). \tag{4.7}$$

Il calcolo del volume di acqua stoccato quotidianamente nel serbatoio è di tipo iterativo e parte dalla condizione di volume di acqua inizialmente stoccata pari a $S(t-1) = S_0$ al tempo $t = 0$: tale volume può variare tra un minimo di $S_0 = 0$ nel caso di cisterna inizialmente vuota e un massimo di $S_0 = V_{\max}$ qualora essa sia invece inizialmente piena. Per determinare il volume idrico stoccato quotidianamente nel serbatoio, si ricorre all'utilizzo del seguente algoritmo iterativo:

$$\begin{cases} if\ (S(t-1) + \Delta S(t)) > V_{TANK} \quad then \quad S(t)_{TANK} = V_{TANK}, \\ if\ (S(t-1) + \Delta S(t)) < V_{TANK} \quad then \quad S(t)_{TANK} = 0 \quad else \quad S(t) = S(t)_{TANK} = S(t-1) + \Delta S(t), \end{cases} \tag{4.8}$$

dove $S(t)_{TANK}$ indica il volume di acqua stoccata attualmente disponibile nel serbatoio al giorno t. Delle due precedenti disequazioni, la prima determina la condizione di serbatoio pieno (con possibile sfioro), mentre la seconda fa sì che la cisterna sia invece vuota o parzialmente piena.

Il volume di sfioro $O(t)$, ossia il volume di acqua che fuoriesce dalla cisterna quando essa è piena, può essere valutato per mezzo del seguente algoritmo:

$$if\ \ S(t) \geq V_{TANK} \quad then \quad O(t) = S(t) - V_{TANK} \quad else \quad O(t) = 0. \tag{4.9}$$

Nel caso in cui il volume di acqua accumulata nel serbatoio $S(t)_{TANK}$ sia inadeguato per far fronte alla domanda $D(t)$, allora la domanda stessa verrà soddisfatta, in parte o completamente, con l'acqua proveniente dalla rete acquedottistica pubblica $T(t)$, che può essere calcolata come segue:

$$if\ (S(t) < D(t)) \quad then \quad T(t) = D(t) - S(t)_{TANK} \quad else \quad T(t) = 0. \tag{4.10}$$

E' quindi possibile determinare un coefficiente di affidabilità (R_c) come il rapporto tra il numero di giorni in cui l'approvvigionamento idrico è garantito solamente dal serbatoio di raccolta dell'acqua piovana e l'ammontare dei giorni della serie temporale impiegati per eseguire il dimensionamento del sistema RWH:

$$R_c = \frac{\sum(giorni\ \ senza\ utilizzo\ \ di\ \ acqua\ \ garantita\ \ via\ nave)}{\sum(giorni\ \ della\ \ serie\ \ temporale\ \ 1990-2012)}. \tag{4.11}$$

Per esaminare differenti casistiche pluviometriche, gli autori hanno estratto dalla serie storica 1990-2012 tre serie temporali sintetiche, confrontando i loro parametri statistici con quelli della serie storica:

- la serie temporale “a” è relativa a condizioni pluviometriche medie, cioè quelle tipiche della zona oggetto di studio;
- la serie temporale “b” fa invece riferimento a regimi pluviometrici estremamente limitati, in modo da simulare un periodo di tempo con scarsità di piogge;
- la serie temporale “c” è infine quella associata ai regimi pluviometrici più abbondanti che sono stati osservati sull’isola.

Ognuna delle quattro precedenti serie temporali è stata utilizzata in modo da valutare l’affidabilità del sistema RWH installato o, in alternativa, per eseguire il suo dimensionamento.

4.2 Analisi costi-benefici

Per poter eseguire una valutazione economica dell’investimento in un sistema di raccolta delle acque piovane sull’isola di Kimolos, facendo riferimento ai costi sostenuti sia dai residenti che dallo Stato, è necessario condurre un’analisi costi-benefici valutando i costi dei consumi idrici e quelli per il trasporto dell’acqua. A causa dell’assenza di risorse locali, il volume di acqua in grado di coprire la domanda idrica viene trasportato sull’isola via nave: il costo dei consumi idrici per gli abitanti è pari a 3 € al metro cubo, mentre i costi di trasporto sostenuti interamente dallo Stato ammontano invece a 12 € al metro cubo. Di seguito sono elencati i principali parametri dell’analisi:

- il serbatoio di stoccaggio possiede una capacità di $15\,m^3$, è realizzato in materiale plastico e presenta una forma cilindrica verticale, con diametro ed altezza entrambi di $2{,}7\,m$;
- l’area della copertura è pari a $140\,m^2$;
- il consumo idrico giornaliero soddisfatto dalla cisterna corrisponde al 35% del totale;
- il consumo idrico medio giornaliero pro capite ammonta a $120\ l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$;
- il numero di residenti dell’edificio considerato è pari a 4 unità.

Complessivamente, la domanda idrica giornaliera per l’edificio in trattazione vale $0{,}17\,m^3$, o in alternativa $61{,}32\,m^3$ ogni anno: il precedente valore viene ripartito in due contributi, ottenuti applicando il modello di bilancio idrico al sistema RWH, pari rispettivamente a $20\,m^3$ prelevati annualmente dai rubinetti e a $42\,m^3$ annui garantiti invece dal serbatoio. Indicativamente, se questi ultimi $42\,m^3$ fossero invece assicurati dal trasporto idrico via nave, il loro costo ammonterebbe a circa 126 € all’anno per i residenti e a circa 504 € all’anno per lo Stato; si considera inoltre un costo tipico per le operazioni di manutenzione pari al 2% annuo, un tasso di attualizzazione del 3% o del 5% e un piano di investimento valutato relativamente ad un periodo di 40 anni.

Nella tabella sottostante viene riportato l'elenco delle singole componenti del sistema RWH considerato e i relativi costi:

Componente del sistema	*Costo* [€]
Pompa	250
Filtri	160
Sistema di distribuzione idrica	170
Tappo del serbatoio	3
Separatore delle acque di prima pioggia	100
Dispositivo di prevenzione del riflusso	120
Serbatoio	2˙800
Costo totale	3˙603

Tabella 4.1: Componenti di un sistema di raccolta dell'acqua piovana e relativi costi [Fonte: Tsihrintzis e Baltas (2013, 2014), Londra (2015, 2017)].

4.3 Risultati e considerazioni finali

Per stimare l'affidabilità del sistema RWH sono stati analizzati due scenari, ossia due casi studio, per ognuno dei quali sono stati utilizzati differenti volumi della cisterna (V_{TANK}), compresi dell'intervallo tra 5 e 50 m^3, e diverse aree della superficie di raccolta delle acque (A), variabili tra 80 e 300 m^2, prendendo in considerazione sia i dati storici nell'intervallo temporale 1990-2012 che le tre serie temporali rappresentative delle diverse condizioni pluviometriche, definite al paragrafo 4.1.

Il modello di bilancio idrico del serbatoio di raccolta delle acque meteoriche è stato applicato facendo riferimento, per quanto riguarda il primo caso studio (scenario I), ai seguenti parametri di input:

- edificio con 4 residenti;
- percentuale della domanda soddisfatta dalla cisterna pari a $p = 35\%$;
- consumo medio giornaliero pro capite $q = 150\ \ l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$.

I quattro diagrammi sottostanti, contenenti ognuno 6 curve relative ad una prefissata capacità (V) del serbatoio di stoccaggio delle acque piovane, possono essere impiegati sia per dimensionare nuovi sistemi RWH che per prevedere l'affidabilità (R_c) che un sistema esistente possiede nel far fronte ad un determinato valore della domanda idrica, in funzione dell'area della copertura (A) e del volume della cisterna (V).

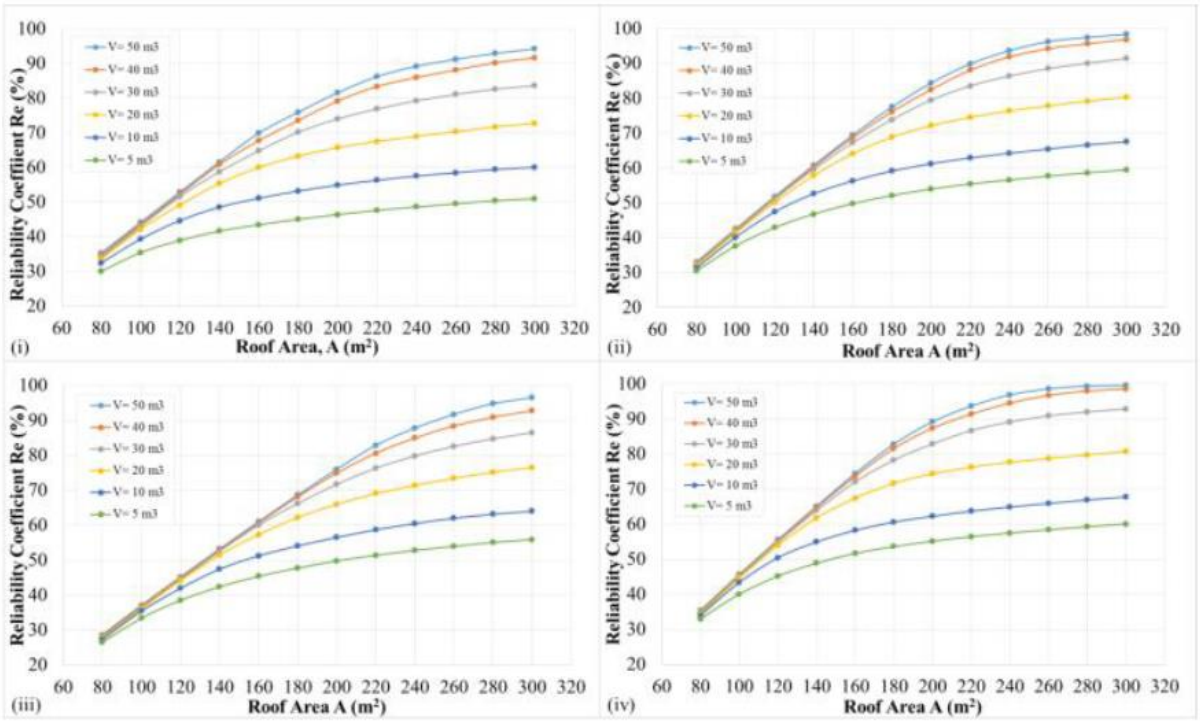

Figura 4.4: Affidabilità in funzione dell'area di copertura e del volume del serbatoio per:
(i) la serie storica (ii) la serie temporale sintetica "a"
(ii) la serie temporale sintetica "b" (iv) la serie temporale sintetica "c"
[Fonte: Tsihrintzis e Baltas (2013, 2014), Londra (2015, 2017)].

Un aspetto comune a tutti i precedenti grafici è che l'affidabilità aumenta all'aumentare dell'area del tetto; al contempo, tutte le serie temporali indicano che un'efficienza del 100% è impossibile da raggiungere per aree della copertura inferiori a $300\,m^2$. L'affidabilità è moderatamente bassa $(R_c < 50\%)$ nel caso di coperture con estensione variabile tra 80 e $120\,m^2$, facendo sì che la cisterna non sia mai in grado di soddisfare tutta la domanda idrica per cui è stata progettata $(p = 35\%)$. Solamente per la serie temporale "c", l'efficienza può raggiungere il 50% con coperture poco estese $(A = 120m^2)$ e con cisterne di capacità ridotta $(V = 10m^3)$: questo risultato era prevedibile, in quanto questa serie temporale fa riferimento ad un'altezza media giornaliera di pioggia maggiore rispetto alle altre serie.

L'efficienza (R_c) pari all'80% può invece essere conseguita solo nel caso di coperture estese: per la serie temporale "a" e per quella storica (1990-2012) questo valore richiede, indipendentemente dal volume del serbatoio, un'area del tetto maggiore di $200\,m^2$, mentre per le serie temporali "b" e "c" l'estensione richiesta deve essere superiore rispettivamente a 220 e $180\,m^2$.
L'affidabilità del 50-60% può essere conseguita, con riferimento alla serie storica, con coperture estese tra 120 e $140\,m^2$; considerando invece le serie temporali "b" e "c", che fanno riferimento ad una condizione rispettivamente meno vantaggiosa e più favorevole della serie storica, l'area del tetto si deve estendere nell'intervallo 140-160 m^2 e 80-100 m^2.
Per quanto riguarda infine la serie temporale "a", l'affidabilità del 50-60% può essere ottenuta con aree del tetto comprese tra 120 e $140\,m^2$, mentre l'80% necessita invece di una superficie variabile tra 160 e $200\,m^2$; valori di efficienza dell'ordine del 90% richiedono infine coperture molto estese, che risultano essere generalmente assenti sull'isola di Kimolos.

Il secondo caso studio (scenario II) focalizza invece l'attenzione sulla ricerca del volume ottimale della cisterna in funzione dell'efficienza desiderata: l'analisi considera un'area della copertura compresa tra 120 e 300 m^2 e una domanda idrica media giornaliera pro capite pari rispettivamente a $q = 150\ l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$ per lo scenario IIa e a $q = 120\ l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$ per lo scenario IIb; il serbatoio è inoltre progettato per soddisfare il 35% della domanda idrica giornaliera totale $(p = 35\%)$, mentre il numero di utenti dell'abitazione è pari a 4.

Considerando dapprima lo scenario IIa, il conseguimento di una determinata efficienza (R_c) richiede contestualmente i seguenti valori dell'estensione della copertura (A) e della capacità della cisterna (V), come si evince dalla tabella sottostante:

Efficienza richiesta	***Capacità della cisterna*** $[m^3]$	***Area della copertura*** $[m^2]$
95%	32-45	≥ 260
85%	24-45	≥ 220
75%	16-34	≥ 180
65%	8-22	≥ 160
55%	3-13	≥ 140

Tabella 4.2: Parametri necessari per ottenere una determinata efficienza (Scenario IIa) [Fonte: Tsihrintzis e Baltas (2013, 2014), Londra (2015, 2017)].

In particolare la seguente figura diagramma, per ognuna delle quattro serie temporali definite al paragrafo 4.1, cinque possibili valori dell'affidabilità (R_c) del sistema in funzione dell'area della copertura (A) e del volume del serbatoio (V):

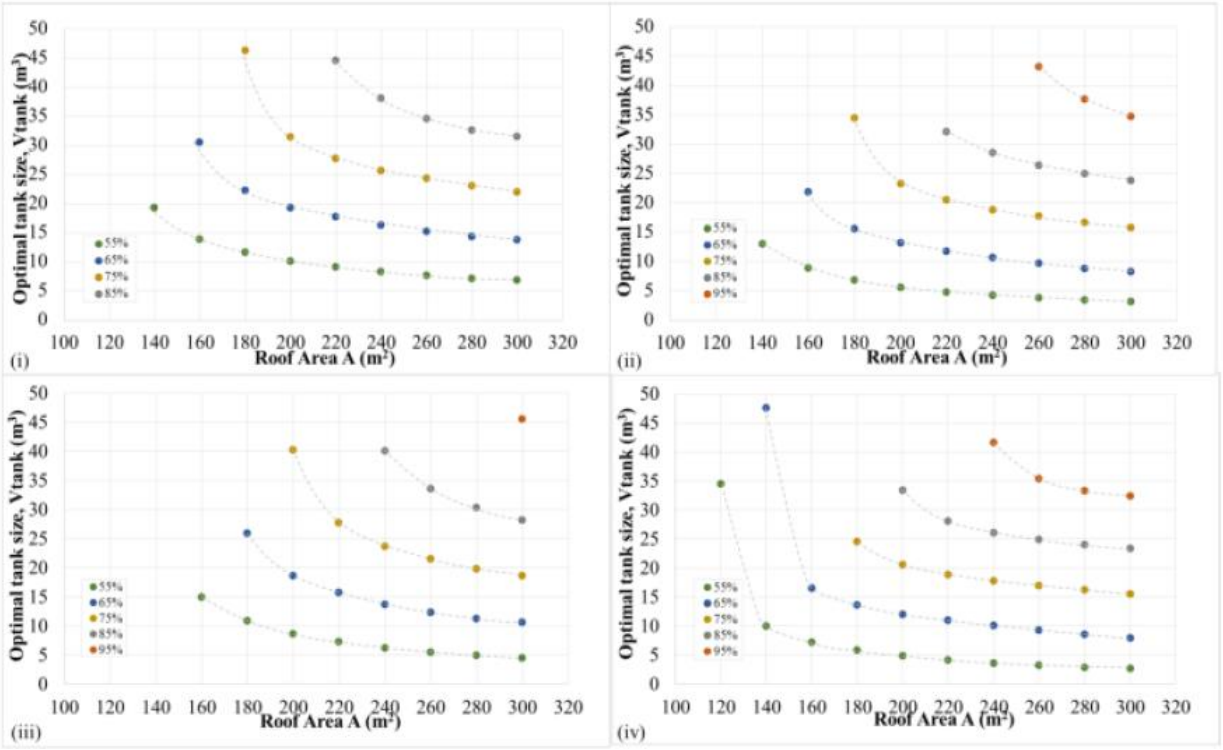

Figura 4.5: Capacità ottimale del serbatoio per soddisfare il 35% della domanda idrica giornaliera per 5 diverse efficienze, 4 utenti e un consumo di 150 $\frac{l}{d \cdot p}$ ***(Scenario IIa), usando:***

(i) la serie storica (ii) la serie temporale sintetica "a"

(iii) la serie temporale sintetica "b" (iv) la serie temporale sintetica "c"

[Fonte: Tsihrintzis e Baltas (2013, 2014), Londra (2015, 2017)].

Dall'analisi dei precedenti grafici è possibile constatare che riducendo l'efficienza richiesta (R_c) diminuisce contestualmente la capacità del serbatoio (V) e quindi anche il costo complessivo del sistema; aumentando invece l'area della superficie di copertura (A) migliorano conseguentemente i benefici economici, in quanto è possibile installare una cisterna più piccola, in accordo con il regime pluviometrico dell'isola di Kimolos.

La serie temporale "b" indica che nessuna delle cinque efficienze desiderate può essere conseguita impiegando coperture con estensione inferiore a $160\,m^2$; inoltre, anche disponendo di maggiori superfici per la raccolta delle acque, le dimensioni ottimali del serbatoio sono più grandi rispetto a quelle ottenute dall'analisi della serie storica e della serie temporale sintetica "a", a parità di efficienza richiesta. Al contrario, i risultati conseguiti per la serie temporale sintetica "c" mostrano che le

affidabilità desiderate possono essere raggiunte anche quando l'area di captazione delle acque meteoriche è più piccola; allo stesso tempo, rispetto alle altre tre serie temporali, sono richieste anche minori capacità della cisterna per conseguire la stessa efficienza del sistema.

Facendo ora riferimento allo Scenario IIb, la seguente tabella riporta i valori dei due parametri (area A della copertura e volume V del serbatoio) necessari per conseguire una determinata efficienza:

Efficienza richiesta	*Capacità della cisterna* $[m^3]$	*Area della copertura* $[m^2]$
95%	24-48	≥200
85%	17-43	≥160
75%	11-36	≥140
65%	5-37	≥120
55%	2-8	≥120

Tabella 4.3: Parametri necessari per ottenere una determinata efficienza (Scenario IIb) [Fonte: Tsihrintzis e Baltas (2013, 2014), Londra (2015, 2017)].

I seguenti diagrammi possono essere confrontati con quelli riportati in figura 4.5:

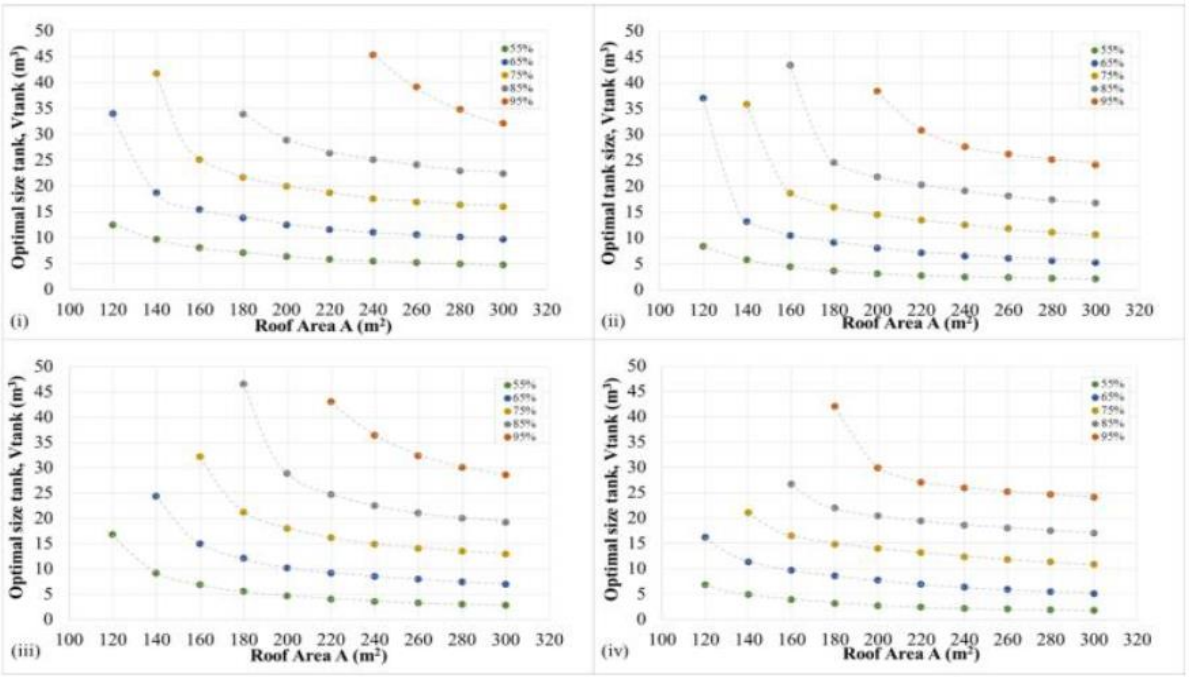

Figura 4.6: Capacità ottimale del serbatoio per soddisfare il 35% della domanda idrica giornaliera per 5 diverse efficienze, 4 utenti e un consumo di 120 $\frac{l}{d \cdot p}$ ***(Scenario IIb), usando:***

(ii) la serie storica (ii) la serie temporale sintetica "a"

(iv) la serie temporale sintetica "b" (iv) la serie temporale sintetica "c"

[Fonte: Tsihrintzis e Baltas (2013, 2014), Londra (2015, 2017)].

Dai precedenti grafici si può osservare che, per tutte le quattro serie temporali prese in esame, la riduzione della domanda idrica media giornaliera pro capite (che passa da $q = 150\ l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$ a $q = 120\ l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$) si traduce in maggiori efficienze (R_c) del sistema RainWater Harvesting. Questi risultati possono essere letti sia in termini di una minore estensione della copertura (A), compresa tra 120 e 140 m^2, che relativamente alla cisterna di stoccaggio delle acque piovane, per la quale sono invece richieste capacità (V) inferiori. Al tempo stesso, consumi idrici minori aumentano lo spettro di possibilità sfruttabili dal progettista per conseguire un determinato valore del rendimento (R_c) del sistema RWH.

Per quanto riguarda l'analisi costi-benefici, gli autori del modello hanno considerato un tasso di attualizzazione pari al 5%, definito come quel tasso d'interesse da impiegare per trasferire al tempo t_0 un capitale finanziario esigibile in data futura, in modo che il capitale attualizzato, cioè esigibile al tempo t_0, sia finanziariamente equivalente a quello esigibile in data futura. Sotto l'ipotesi che il costo per il trasporto dell'acqua sia a carico dello Stato, ne deriva che l'investimento per tutti i residenti di Kimolos risulta essere economicamente praticabile con un periodo di ammortamento di 20 anni, mentre il periodo di ammortamento relativo ad un tasso di attualizzazione del 3% è invece pari a 28 anni. Tuttavia, come previsto, facendo riferimento al prezzo attuale dell'acqua, l'investimento non è praticabile per i residenti nel caso di investimenti privati, come ad esempio quando sono gli abitanti stessi a finanziare il sistema RWH domestico.

Le principali conclusioni che derivano dallo studio sono le seguenti:

- il dimensionamento del sistema RWH evidenzia che le affidabilità maggiori richiedono la presenza sia di superfici di copertura estese che di una domanda idrica media giornaliera pro capite relativamente contenuta, generalmente inferiore a 150 $l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}$;
- siccome la maggior parte delle piccole isole del Mediterraneo non presenta edifici con grandi coperture, l'affidabilità dei sistemi di raccolta delle acque meteoriche è modesta e in generale pari ad $R_c \leq 50\%$, soprattutto nel caso di consumi giornalieri pro capite elevati;
- la riduzione della domanda idrica giornaliera aumenta il rendimento del sistema e richiede serbatoi con capacità minore; il consumo idrico giornaliero determina un grande impatto sull'efficienza complessiva e sul volume della cisterna e costituisce pertanto un parametro di fondamentale importanza per progettare un sistema RWH;
- l'analisi costi-benefici mette in evidenza che gli investimenti sono attuabili quando i costi di trasporto sono a carico non dei residenti bensì dello Stato.

Occorre infine tenere presente che esistono benefici, provenienti dall'installazione dei sistemi per lo stoccaggio delle acque meteoriche, che non sono stati direttamente quantificati nella precedente analisi, quali un indice di qualità delle acque relativamente elevato ed emissioni atmosferiche contenute, nonché un notevole incremento relativamente all'indipendenza per l'approvvigionamento idrico. Al tempo stesso il modello analizzato presenta dei limiti applicativi: facendo infatti riferimento ad un valore medio del consumo idrico giornaliero pro capite, i risultati ottenuti in termini di affidabilità R_c del sistema RWH saranno affetti da un errore statistico maggiore di quello associato ai consumi idrici reali del sito in esame.

4.4 Tabelle riassuntive del modello di Tsihrintzis et al. (2013-2017)

Nella tabella seguente vengono elencati i diversi parametri che occorre conoscere, in modo da poterli implementare all'interno del modello:

Simbolo	*Significato fisico*	*Unità di misura*
C	Coefficiente di deflusso della copertura	$[-]$
A	Area della proiezione orizzontale della copertura	$[m^2]$
$P(t)$	Altezza giornaliera di precipitazione	$[mm]$
N_{cap}	Numero di residenti dell'edificio	$[-]$
q	Consumo idrico medio giornaliero pro capite	$[l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}]$
p	Consumo idrico giornaliero soddisfatto dalla cisterna	$[\%]$
V_{TANK}	Volume della cisterna	$[m^3]$

Tabella 4.4: Input del modello di Tsihrintzis et al. (2013-2017).

I termini precedenti devono essere elaborati come indicato nel paragrafo 4.1, in modo da ricavare le tre seguenti grandezze intermedie:

Simbolo	*Significato fisico*	*Unità di misura*
$S(t)$	Volume idrico stoccato al termine del giorno considerato	$[m^3]$
$D(t)$	Domanda idrica giornaliera dell'edificio	$[m^3]$
$T(t)$	Volume idrico prelevato quotidianamente dall'acquedotto	$[m^3]$

Tabella 4.5: Parametri impiegati per calcolare l'affidabilità di un sistema RWH.

Noti i tre precedenti parametri, è possibile utilizzarli per determinare analiticamente, sulla base dell'equazione (4.11), il coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH, ossia il rapporto adimensionale tra il numero di giorni in cui l'approvvigionamento idrico è garantito esclusivamente dal serbatoio di raccolta delle acque meteoriche e l'ammontare totale di giorni della serie temporale impiegati per dimensionare il sistema stesso. Tale parametro dovrà tendere il più possibile al valore unitario, in modo da svincolare il più possibile l'utenza dai prelievi idrici dalla rete acquedottistica e aumentare di conseguenza l'efficienza del sistema; viceversa, se il coefficiente si avvicinasse progressivamente a zero, il sistema risulterebbe mal dimensionato.

L'affidabilità R_c del sistema RWH può essere calcolata facendo riferimento alla serie storica dei dati di pioggia disponibili, oppure relativamente ad un anno siccitoso, ad un anno piovoso o ancora ad un anno rappresentativo delle condizioni pluviometriche medie del sito in esame.

Per quanto riguarda invece l'aspetto economico, è necessario impiegare le seguenti grandezze:

Simbolo	***Significato fisico***	***Unità di misura***
A	Area della proiezione orizzontale della copertura	$\left[m^2\right]$
q	Consumo idrico medio giornaliero pro capite	$\left[l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}\right]$
p	Consumo idrico giornaliero soddisfatto dalla cisterna	$\left[\%\right]$
N_{cap}	Numero di residenti dell'edificio	$\left[-\right]$
V_{TANK}	Volume della cisterna	$\left[m^3\right]$
C_{INST}	Costi totali di installazione del sistema RWH	$\left[€\right]$
C_{MANUT}	Costi per la manutenzione annua	$\left[€ \cdot y^{-1}\right]$
$C_{CONSUMI}$	Costo dei consumi idrici	$\left[€ \cdot \left(m^3\right)^{-1}\right]$
$C_{TRASPORTO}$	Costi di trasporto	$\left[€ \cdot \left(m^3\right)^{-1}\right]$
r	Tasso di attualizzazione	$\left[\%\right]$

Tabella 4.6: Input per lo svolgimento dell'analisi costi-benefici.

Le precedenti grandezze sono state utilizzate dagli autori del modello per eseguire un'analisi costi-benefici la quale, sotto l'ipotesi semplificativa che il costo per il trasporto dell'acqua sia ad esclusivo carico dello Stato, determina come risultato finale il numero di anni necessari per rendere l'investimento economicamente praticabile: l'installazione del sistema RWH non solo disaccoppierà parzialmente i consumi idrici dal trasporto dell'acqua via nave ma determinerà anche dei vantaggi economici in un arco di tempo relativamente breve.

5. Normativa UNI/TS 11445: impianti per la raccolta e l'utilizzo dell'acqua piovana

Questo capitolo ha l'obiettivo di descrivere i principali aspetti relativi alla norma italiana UNI/TS 11445:2012, che costituisce il riferimento su scala nazionale per quanto riguarda la progettazione, l'installazione e la manutenzione degli impianti per la raccolta e l'utilizzo dell'acqua piovana. La scelta di approfondire questo argomento nasce dal fatto che questo sistema di approvvigionamento idrico alternativo presenta notevoli vantaggi non solo dal punto di vista economico ma soprattutto per quanto concerne il rispetto dell'ambiente, grazie ad un minore volume idrico prelevato dalla rete acquedottistica.

La specifica tecnica, elaborata sotto la competenza della Commissione Tecnica UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione), definisce i requisiti generali delle fasi di progettazione, realizzazione, esercizio e manutenzione degli impianti destinati al recupero delle acque meteoriche per usi diversi dal consumo umano, in ambito residenziale e similare. La suddetta norma è stata ratificata dal Presidente dell'UNI ed è entrata a far parte del corpo normativo nazionale il 24 maggio 2012; la periodicità con cui viene sottoposta a riesame è quella triennale.
La normativa è applicabile a tutti gli utilizzi domestici diversi dal consumo umano, purché gli impianti siano dotati di una rete di distribuzione interna separata da quella di distribuzione dell'acqua destinata all'uso umano; l'acqua piovana a cui si fa riferimento può essere raccolta e successivamente utilizzata per l'irrigazione dei giardini, lo scarico cassette WC, gli impianti di lavaggio delle superfici di pertinenza e per altri usi non potabili consentiti dalla legislazione vigente.

5.1 Aspetti generali

L'acqua piovana può essere considerata una risorsa di fondamentale importanza, in quanto è applicabile per diversi scopi, ove non sia necessaria acqua di qualità destinata al consumo umano; non sono quindi presi in considerazione gli usi potabili, quali l'acqua utilizzata per bere, per cucinare, per la preparazione dei cibi e per l'igiene personale, nonché per la pulizia degli oggetti che vengono a contatto con gli alimenti: per quanto riguarda le precedenti modalità di impiego è infatti richiesta necessariamente l'acqua potabile, ai sensi della legislazione vigente.

Per quanto riguarda invece ambiti diversi, quali ad esempio il settore terziario, quello commerciale oppure strutture pubbliche, la presente specifica tecnica può essere presa come riferimento solamente

in alcune delle sue parti, come nel caso del dimensionamento degli impianti, e necessita pertanto di valutazioni tecniche aggiuntive.
Gli impianti per il recupero e il convogliamento delle acque meteoriche devono essere progettati e quindi realizzati in modo tale da non interferire con gli impianti per il convogliamento dell'acqua destinata al consumo umano, cui non devono essere arrecati particolari pericoli dal punto di vista igienico e la cui qualità non deve essere intaccata.
Per quanto riguarda la raccolta dell'acqua piovana in ambito domestico, le superfici di captazione più adatte sono costituite dalle coperture, piane o inclinate, degli edifici. Per quanto concerne invece l'aspetto igienico, l'acqua piovana contiene numerosi materiali depositati sulla superficie di captazione, facendo sì che gli agenti patogeni possano introdursi all'interno del sistema di raccolta, con conseguente potenziale rischio di infezione dovuto alla proliferazione batterica. Altre sostanze disciolte, come quelle provenienti dalle coperture bituminose o dalla decomposizione organica delle foglie, possono inoltre abbattere il livello qualitativo delle acque stoccate, pregiudicando l'aspetto funzionale del sistema di approvvigionamento idrico alternativo.

5.2 Progettazione di un impianto di stoccaggio delle acque piovane

Nella progettazione di un sistema di accumulo, occorre tenere in considerazione il luogo di installazione, le dimensioni del sistema e le indicazioni della ditta produttrice. In fase di dimensionamento, occorre far sì che il fondo dell'accumulo non venga mai aspirato, in modo da evitare il prelievo di eventuali sedimenti e detriti; le tubazioni di distribuzione dell'acqua piovana devono essere inoltre progettate e installate in conformità alle norme UNI EN 806 "Specifiche relative agli impianti all'interno di edifici per il convogliamento di acque destinate al consumo umano" e UNI 9182 "Impianti di alimentazione e distribuzione d'acqua fredda e calda – Criteri di progettazione, collaudo e gestione":

5.2.1 Metodo semplificato

Il primo metodo di calcolo che consente di determinare il volume di una cisterna di raccolta delle acque meteoriche è il metodo semplificato: esso consente di effettuare un rapido dimensionamento del sistema ed è consigliato per la progettazione degli impianti di piccole o medie dimensioni.

L'utilizzo di tale metodo è limitato alle seguenti condizioni di applicazione:

- la richiesta di acqua piovana per uso domestico diverso dal consumo umano deve essere caratterizzata da domande idriche uniformi nel corso dell'anno;

- la tipologia prevalente delle superfici di captazione deve essere la copertura dell'edificio;
- il sistema di accumulo deve essere chiuso e/o coperto, in modo da evitare le perdite idriche per evaporazione.

La capacità ottimale di stoccaggio deve essere calcolata in funzione dei seguenti parametri:

- il regime pluviometrico: la valutazione del regime di pioggia è limitata alla stima, espressa in millimetri, della precipitazione media annua caratteristica del sito in esame. Tale dato può essere determinato operando una media delle altezze annuali relative ad una serie storica di precipitazioni osservate presso il sito in esame, di durata almeno trentennale;
- le dimensioni e le caratteristiche delle superfici di captazione: la superficie di captazione, nel caso di coperture, corrisponde alla proiezione orizzontale dell'area dell'edificio, comprese le sporgenze della copertura, indipendentemente dalla sua forma ed inclinazione. Nel caso in cui venga utilizzata solo una parte della copertura, occorrerà considerare unicamente la proiezione orizzontale della stessa.
  Contestualmente all'area della copertura, viene anche preso in esame il coefficiente di afflusso φ, che esprime il rapporto tra l'afflusso meteorico e la precipitazione. La tabella seguente riporta i valori assunti dal precedente parametro in funzione delle tipologie di copertura più diffuse:

Tipologia di copertura	$\varphi\,[-]$
Copertura impermeabile a falda	0,8
Copertura impermeabile piana	0,7
Copertura permeabile (es: verde pensile)	0,5
Superficie impermeabile a terra	0,7

Tabella 5.1: Valori del coefficiente di afflusso φ.

I parametri definiti precedentemente consentono di calcolare l'afflusso meteorico annuo $Q\,[l]$, sulla base dell'equazione sottostante:

$$Q = \varphi \cdot P \cdot A\,, \tag{5.1}$$

con:

- $\varphi\,[-]$: coefficiente di afflusso;
- $P\,[mm]$: precipitazione annua;
- $A\,[m^2]$: proiezione orizzontale della superficie di captazione.

- la richiesta attuale e futura di acqua non potabile: la domanda idrica pro capite per utilizzi diversi dal consumo umano (r) può essere assunta pari a 50 litri al giorno per abitante oppure al 30% del consumo idrico effettivo; tale fabbisogno si riferisce principalmente alla richiesta di acqua per il flussaggio dei WC. Per altre modalità di utilizzo, nonché per determinare la stima della richiesta di acqua, occorre fare riferimento alla seguente tabella:

Utilizzo	*Fabbisogno giornaliero pro capite*	*Fabbisogno annuale*
WC nelle abitazioni	$40\,l$	-
WC negli uffici	$30\,l$	-
WC negli edifici scolastici	$20\,l$	-
Lavatrice	$15\,l$	-
Irrigazione per 1 m² di area a verde	-	$300\ \frac{l}{m^2}$

Tabella 5.2: Determinazione del fabbisogno idrico per usi domestici diversi dall'uso umano.

Il volume idrico $R[l]$ richiesto per il consumo annuo domestico diverso da quello umano è pertanto calcolato con riferimento alla seguente espressione:

$$R = n \cdot r \cdot 365\,, \tag{5.2}$$

con:

- $n\,[-]$: numero di residenti dell'edificio;
- $r[l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}]$: richiesta giornaliera pro capite;
- $365\,[d]$: numero di giorni in un anno.

La richiesta di acqua per usi domestici diversi dal consumo umano (R) deve essere confrontata con l'afflusso meteorico annuale (Q): tale confronto consente di determinare il volume utile (V_u) del serbatoio di stoccaggio delle acque meteoriche, che è calcolato, sulla base del minimo tra i due precedenti valori, con la seguente formulazione:

$$V_u = 0{,}06 \cdot \min(Q; R), \tag{5.3}$$

con:

- $V_u\,[l]$: volume utile della cisterna;
- $Q\,[l]$: afflusso meteorico annuo;
- $R[l]$: richiesta annua per usi domestici diversi dal consumo umano.

La relazione precedente risulta particolarmente vantaggiosa, in quanto consente di compensare la variabilità degli afflussi meteorici: in particolare il 6% assicura un completo soddisfacimento della domanda idrica per archi temporali con assenza di precipitazioni di durata massima pari a 21 giorni.

Una seconda possibilità è invece di tipo grafico ed è basata sull'utilizzo dei due abachi seguenti, i quali consentono la determinazione speditiva del volume utile (V_u) del sistema di accumulo, facendo riferimento rispettivamente ad edifici occupati da 4 e da 8 abitanti.

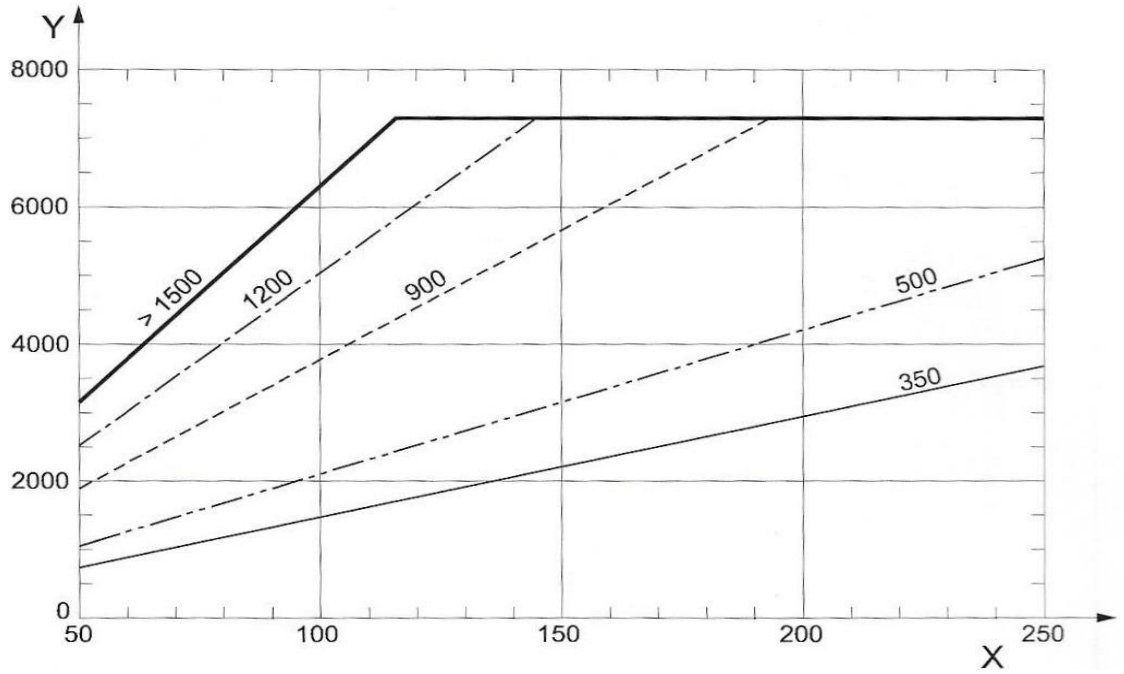

Figura 5.1: Volume utile del sistema di accumulo a servizio di 4 abitanti in funzione della superficie di copertura.

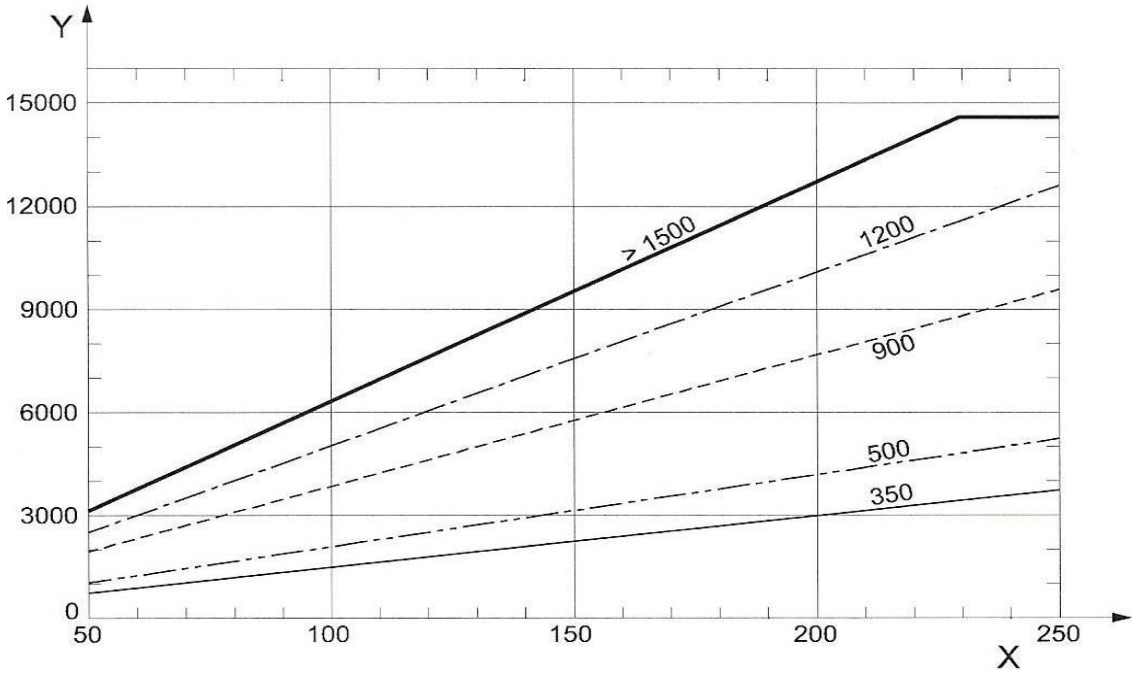

Figura 5.2: Volume utile del sistema di accumulo a servizio di 8 abitanti in funzione della superficie di copertura.

L'asse delle ascisse (X) esprime l'area della copertura $A[m^2]$, mentre l'asse delle ordinate $Y[m^2]$ indica invece il volume utile $V_u[l]$ della cisterna di stoccaggio dell'acqua piovana.
I precedenti abachi sono stati ottenuti considerando un coefficiente di afflusso φ pari a 0,7 ed una domanda idrica pro capite pari a 50 litri al giorno; i valori indicati su ognuna delle cinque curve di ogni grafico fanno riferimento alle altezze medie annue di pioggia, espresse in millimetri.

Determinato il volume utile (V_u) del sistema di accumulo, è necessario calcolare il relativo volume ottimale (V_o): quest'ultimo permette di massimizzare le prestazioni dell'intero impianto ed è ottenuto correggendo il volume utile (V_u) mediante un coefficiente di sicurezza (C_s) pari a 1,5, che consente di realizzare un sistema efficiente anche in presenza di variazioni significative della condizioni pluviometriche e delle modalità di utilizzo della risorsa idrica. La formula impiegata è la seguente:

$$V_o = V_u \cdot C_s, \tag{5.4}$$

con:

- $V_0[l]$: volume ottimale del sistema;
- $V_u[l]$: volume utile del sistema;
- $C_s[-]$: coefficiente di sicurezza.

5.2.2 Metodo analitico

Il metodo analitico costituisce la seconda modalità per la determinazione del volume di un serbatoio di raccolta delle acque piovane ed è utilizzato, in particolar modo, per dimensionare gli impianti di grandi dimensioni. La procedura analitica si basa su un bilancio di massa che è definito dalla seguente espressione:

$$V(t) = Q(t) + V(t-1) - Y(t) - O(t) - E(t), \tag{5.5}$$

con:

- $V(t)\,[m^3]$: volume immagazzinato nel sistema;
- $Q(t)\,[m^3]$: afflusso meteorico;
- $Y(t)\,[m^3]$: volume di acqua erogata;
- $O(t)\,[m^3]$: volume sfiorato, defluente verso la rete fognaria;
- $E(t)\,[m^3]$: volume evaporato;
- t: istante di calcolo.

Il termine di evaporazione $E(t)$ può essere trascurato nel caso in cui il serbatoio di stoccaggio delle acque meteoriche sia coperto oppure interrato. Il volume $V(t)$ immagazzinato nel sistema ed il volume $Y(t)$ di acqua erogata al tempo t sono invece calcolati utilizzando la regola di gestione denominata con il termine anglosassone YAS (Yield After Spillage), fondata sul seguente principio di funzionamento:

$$Y(t) = \min\begin{cases} R(t) \\ V(t-1) \end{cases} \tag{5.6}$$

$$V(t) = \min\begin{cases} V(t-1) + Q(t) - Y(t) \\ S - Y(t) \end{cases} \tag{5.7}$$

con:

- $S\ [m^3]$: capacità del sistema di accumulo;
- $R(t)\ [m^3]$: domanda idrica annua per l'uso domestico diverso dal consumo umano.

I bilanci idrici basati sull'applicazione dell'algoritmo YAS forniscono una valutazione cautelativa dell'efficienza del sistema, indipendentemente dalla scala temporale utilizzata nel modello. Nonostante studi precedenti abbiano dimostrato la scarsa influenza che la condizione iniziale del sistema di accumulo produce sui risultati finali, per non eseguire una stima eccessiva delle prestazioni del sistema si consiglia di iniziare la simulazione con l'ipotesi di cisterna di stoccaggio vuota.

La serie dei dati pluviometrici richiede almeno 30 anni consecutivi di osservazioni, in modo da simulare, con un sufficiente livello di approssimazione, il reale comportamento del sistema. L'adozione di una scala temporale giornaliera per l'algoritmo di calcolo è generalmente consigliata per tutti i casi in cui si verifica la seguente disuguaglianza:

$$\frac{S}{Q} \geq 0{,}01\,, \tag{5.8}$$

ossia quando il volume del serbatoio di raccolta è pari almeno all'1% dell'afflusso meteorico annuo: la precedente condizione fornisce pertanto valutazioni attendibili del rendimento del sistema di accumulo delle acque piovane; nel caso di sistemi di accumulo di capacità ridotta, cioè quando vale la relazione:

$$\frac{S}{Q} < 0{,}01\,, \tag{5.9}$$

è invece necessario ricorrere ad un modello di bilancio idrico definito su una scala temporale più ridotta, come ad esempio quella oraria o sub-oraria.

In conclusione, il metodo analitico consente di determinare alla scala temporale adottata, le seguenti grandezze:

- $Q(t)\left[m^3\right]$: afflusso meteorico;
- $Y(t)\left[m^3\right]$: volume erogato;
- $V(t)\left[m^3\right]$: volume immagazzinato nel sistema di accumulo;
- $O(t)\left[m^3\right]$: volume sfiorato.

Sulla base dei precedenti risultati, è possibile valutare analiticamente i livelli prestazionali in funzione della capacità di accumulo (S) del sistema; il dimensionamento della cisterna di stoccaggio delle acque piovane viene pertanto eseguito sulla base dell'efficienza richiesta dal progettista.

5.3 Componenti di un impianto di stoccaggio delle acque piovane

5.3.1 Superfici di captazione

Le coperture degli edifici costituiscono le superfici più adatte per effettuare il recupero dell'acqua piovana ad uso domestico; in particolare, sono da favorire quelle che sono caratterizzate da un basso tenore di inquinamento. Le caratteristiche delle coperture e, più in generale, delle superfici di captazione devono essere valutate in base al successivo utilizzo dell'acqua piovana:

- nel caso di tetti verdi, si deve prevedere l'eventualità di una colorazione marrone dell'acqua, dovuta alla filtrazione della stessa attraverso lo strato di terreno che costituisce la copertura;
- per coperture con manti bituminosi, è invece frequente la colorazione giallastra dell'acqua;
- l'acqua raccolta dai tetti rivestiti con lastre di rame o di zinco potrebbe contenere elevate concentrazioni di metalli nel periodo iniziale, ossia dopo la posa, con conseguente decadimento delle caratteristiche qualitative delle acque raccolte;
- i materiali di copertura contenenti amianto rilasciano, nel lungo periodo, fibre di amianto;
- in caso di siccità, sulle superfici ruvide delle coperture si accumulano sostanze solide che vengono successivamente dilavate nei primi istanti della precipitazione.

Allo scopo di ottimizzare la raccolta delle acque piovane, vale il principio secondo cui si dovrebbe utilizzare, come superficie di captazione, l'area più estesa possibile; l'area della copertura, così come il volume ideale del sistema di accumulo, deve essere calcolata sulla base delle necessità dell'utenza e quindi del dimensionamento del serbatoio di stoccaggio.

Occorre poi considerare che superfici diverse presentano differenti caratteristiche di drenaggio: ad esempio, il volume di acqua che defluisce dai tetti verdi è circa il 50% rispetto al totale che precipita sulla copertura stessa. Inoltre, dopo periodi prolungati in assenza di precipitazioni, la frazione di acqua piovana recuperabile può ridursi a causa dell'iniziale assorbimento da parte delle superfici porose.

5.3.2 Tubazioni di raccolta delle acque meteoriche

Le grondaie e i pluviali, che costituiscono la rete di raccolta delle acque piovane, devono funzionare come parti di un unico sistema, con accesso garantito per effettuare le operazione periodiche di manutenzione e di pulizia; lo scopo di queste tubazioni è quello di consentire il normale flusso dell'acqua dalla superficie di captazione al sistema di accumulo, per effetto gravitazionale o a depressione.
Le tubazioni e i raccordi che fanno parte del sistema di raccolta dell'acqua piovana devono rispettare i requisiti indicati nella norma UNI EN 476 "Requisiti generali per componenti utilizzati nelle connessioni di scarico e nei collettori di fognatura per sistemi di scarico a gravità" e nelle relative norme di prodotto; nel caso di tubazioni interrate, occorre invece fare riferimento alla norma UNI EN 1610 "Costruzione e collaudo di connessioni di scarico e collettori di fognatura". Le operazioni di dimensionamento, controllo, manutenzione e scelta dei materiali devono essere infine effettuate nel rispetto della norma UNI EN 12056 "Sistemi di scarico funzionanti a gravità all'interno degli edifici", in particolare:

- Parte 1: Requisiti generali e prestazioni;
- Parte 3: Sistemi per l'evacuazione delle acque meteoriche, progettazione e calcolo;
- Parte 4: Progettazione e calcolo;
- Parte 5: Installazione e prove, istruzioni per l'esercizio, la manutenzione e l'uso.

Le tubazioni di raccolta dell'acqua piovana possono essere costituite da diverse tipologie di materiali, come ad esempio:

- policloruro di vinile non plastificato (PVC-U);
- polietilene (PE);
- polipropilene (PP).

5.3.3 Filtrazione meccanica e sedimentazione

Le procedure di trattamento implicano l'adozione di misure atte a migliorare la qualità delle acque meteoriche: sono considerate efficaci la filtrazione meccanica e la sedimentazione che avviene nei serbatoi di accumulo, mentre i filtri parafoglie installati nelle grondaie e nei pozzetti pluviali non possono essere considerati conformi a quanto previsto dalla norma UNI/TS 11445.

La filtrazione meccanica delle acque meteoriche è considerata indispensabile per conseguire il corretto funzionamento di un impianto di stoccaggio: questa procedura consiste generalmente nel passaggio dell'acqua in un primo filtro grossolano e successivamente in un filtro fine, fino a raggiungere il sistema di accumulo. La filtrazione grossolana può avvenire mediante una maglia collocata nelle grondaie oppure attraverso un unico filtro centrale, mentre la filtrazione fine è invece realizzata attraverso un sistema di filtri a maglia, generalmente autopulenti, che non necessitano di una eccessiva manutenzione; tuttavia, possono rimanere intrappolati filamenti, residui grassi o oleosi, che provocano una progressiva riduzione della funzionalità del filtro. L'acqua di riflusso, contenente i residui della filtrazione, viene infine convogliata verso la rete fognaria.
Il filtro deve possedere un'efficienza pari ad almeno il 90% e deve essere selezionato in funzione delle portate da convogliare, nonché della capacità di depurazione e del luogo di installazione del sistema. Nonostante esistano molte altre tipologie di filtri, come quelli in stoffa o granulari, esse non sono considerate adatte per gli edifici residenziali poiché potrebbero causare l'accumulo di batteri e di sostanze nocive nell'acqua filtrata.

L'acqua piovana, anche dopo essere stata filtrata, contiene ancora piccole quantità di sostanze solide a granulometria fine: per eliminare queste particelle, si rende necessario un processo di sedimentazione all'interno dei sistemi di accumulo. Il tempo di sedimentazione dipende dalla densità, dalla dimensione e dalla forma delle particelle e può essere calcolato a partire dalla velocità di sedimentazione, ottenuta dall'applicazione della legge di Stokes:

$$v_s = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\mu} \cdot g \cdot r^2, \qquad (5.10)$$

con:

- v_s : velocità di sedimentazione;
- ρ_s : densità delle particelle solide;
- ρ_f : densità dell'acqua;
- μ : viscosità dinamica dell'acqua;
- g : accelerazione gravitazionale;
- r : raggio delle particelle.

Per quanto concerne la sedimentazione, occorre rispettare i seguenti criteri:

- la tubazione di raccolta non deve ostacolare il processo di sedimentazione: si deve cioè evitare che l'acqua fluisca troppo velocemente e che il sedimento situato sul fondo del sistema di accumulo sia conseguentemente ridistribuito in tutto il serbatoio;
- per impedire l'immissione di sedimenti all'interno delle tubazioni che costituiscono il sistema di distribuzione domestica, l'alimentazione deve essere provvista di soluzioni adeguate, da progettare in funzione del sistema di accumulo prescelto (es: stabilizzatore di flusso);
- è possibile prevedere un'apposita inclinazione del fondo della cisterna, in modo da agevolare l'asportazione del materiale sedimentato sul fondo.

Il prelievo dell'acqua deve essere effettuato in modo tale da:

- evitare che sostanze solide vengano convogliate nelle tubazioni di distribuzione;
- garantire una bassa velocità di aspirazione;
- prevenire correnti di disturbo.

Se la manutenzione è effettuata correttamente, la presenza di sedimenti nel sistema di accumulo non influirà negativamente sulla qualità dell'acqua stoccata.

5.3.4 Sistema di accumulo

I sistemi di accumulo possono essere collocati fuori terra oppure interrati: in generale, il luogo di installazione deve essere scelto anche in modo da proteggere l'acqua dal gelo, dalla luce e dalle escursioni termiche; possono essere prefabbricati oppure realizzati in opera, singoli (compresi quelli modulari) oppure multipli. I materiali impiegati nella costruzione non devono influire negativamente sulla qualità dell'acqua raccolta e sull'ambiente circostante, devono essere adatti alle caratteristiche del terreno e al luogo in cui è prevista la loro installazione e devono garantire la tenuta d'acqua dei manufatti, senza favorire la proliferazione degli agenti patogeni. Si considerano idonei i seguenti materiali:

- materie plastiche;
- materie plastiche fibro-rinforzate;
- calcestruzzo;
- acciai protetti o resistenti alla corrosione.

Le aperture dei sistemi di accumulo devono avere una dimensione tale da agevolare le operazioni di ispezione, pulizia e manutenzione e devono inoltre essere conformi alle relative norme di prodotto. La collocazione dei sistemi di accumulo deve essere inoltre tale da evitare che l'acqua immagazzinata

raggiunga temperature tali da favorire la diffusione dei batteri.
Qualora i sistemi di accumulo siano posizionati al di sopra di aree abitate, deve essere tenuto in considerazione il rischio di eventuali perdite, predisponendo scarichi addizionali e pompe di aspirazione; occorre inoltre verificare che la struttura su cui insiste il manufatto sia in grado di sostenere il peso dell'intero sistema di stoccaggio.
Per garantire una migliore qualità dell'acqua prelevata, è preferibile utilizzare un tubo aspirante con prelievo a galleggiante, la cui posizione ottimale è variabile approssimativamente tra 100 e 150 mm al di sotto della superficie dell'acqua; qualora questo non sia possibile, occorrerà installare una tubazione aspirante con prelievo fisso collocato all'incirca 150 mm sopra il fondo del sistema di accumulo.

Tutti i sistemi di stoccaggio delle acque piovane devono essere provvisti di un adeguato sistema di troppopieno, in modo da scaricare l'acqua in eccesso che tracima durante gli eventi meteorici consistenti: la portata della tubazione di troppopieno deve essere almeno pari a quella della tubazione di alimentazione. Il troppopieno deve essere equipaggiato con una valvola di non ritorno, per evitare che le acque provenienti dalla fognatura e piccoli animali, quali insetti e roditori, possano risalire all'interno del sistema di accumulo; per migliorare ulteriormente l'efficienza del sistema, è possibile inserire una rete all'estremità del condotto di troppopieno, nonché un sifone per evitare l'esalazione dei gas fognari. Nella maggioranza dei casi, il sistema di troppopieno è collegato ad un sistema di infiltrazione nel terreno; qualora quest'ultimo sia invece scarsamente permeabile, è possibile collegare il troppopieno alla rete di scarico delle acque meteoriche.

5.3.5 Pompe

Per i sistemi che non distribuiscono l'acqua piovana per gravità, è necessario l'impiego di una o più pompe tali da garantirne la continua disponibilità: la scelta del numero di pompe da installare è funzione delle dimensioni dell'impianto e della domanda idrica prevista per ogni singolo edificio.
La pompa deve essere scelta ed installata in modo da:

- minimizzare l'inquinamento acustico e il consumo di energia elettrica;
- prevenire la cavitazione, cioè la formazione di bolle che implodendo danneggiano il sistema;
- evitare l'immissione di aria all'interno delle tubazioni di distribuzione.

Il sistema richiede l'installazione di un dispositivo di prevenzione dal funzionamento a secco; anche i colpi d'ariete possono essere prevenuti o assorbiti tramite la predisposizione di vasi d'espansione o di dispositivi per il controllo della pressione, evitando così la nascita di eccessive pressioni all'interno del sistema.

Se collocata all'esterno del sistema di accumulo, la pompa deve essere provvista di un meccanismo di auto-adescamento oppure di un sistema di controllo; occorre poi che essa sia collocata in una posizione ben ventilata, protetta dagli sbalzi termici e provvista anche di inserti antivibranti ed insonorizzanti. Lungo la linea di aspirazione alla pompa deve essere installata una valvola di non ritorno, con il compito di evitare lo scarico della colonna d'acqua.

Qualora si preveda invece l'installazione di pompe immerse, la profondità di immersione deve coincidere con quella indicata dal produttore; occorre inoltre che al di sopra della pompa sia sempre presente un livello idrico minimo, prevenendo pertanto i possibili danni dovuti all'aspirazione dell'aria e dei sedimenti. Le pompe immerse devono poi essere collocate in un luogo accessibile, in modo da garantirne la periodica manutenzione e l'eventuale sostituzione in caso di guasti. Così come per le pompe esterne al sistema di accumulo, anche quelle interne devono essere equipaggiate con una valvola di non ritorno, per evitare lo scarico della colonna d'acqua, e con una valvola di arresto, per consentirne la manutenzione.

5.3.6 Unità di controllo

In tutti i sistemi per il recupero delle acque piovane deve essere prevista un'unità di controllo, la quale deve assicurarne il corretto funzionamento e in particolare:

- comandare la pompa per soddisfare la domanda idrica dell'utenza;
- proteggere la pompa dal funzionamento a secco;
- proteggere il motore dal surriscaldamento o dagli eventuali sovraccarichi elettrici;
- permettere l'azionamento manuale della pompa;
- minimizzare il logoramento operativo e il consumo di energia elettrica;
- attivare automaticamente l'eventuale alimentazione supplementare, fino al raggiungimento del livello minimo prefissato nel sistema di accumulo.

Per quanto riguarda invece le prestazioni opzionali, l'unità di controllo può:

- mostrare il livello di acqua nel sistema di accumulo;
- essere collegata ad un sistema domotico di gestione dell'edificio;
- mostrare in tempo reale l'utilizzo di acqua piovana o di alimentazione supplementare;
- mostrare i valori relativi ai consumi di acqua piovana e di quella contenuta nel sistema di alimentazione supplementare;
- essere dotata di un display atto a mostrare i possibili segnali di malfunzionamento, come ad esempio quelli della pompa;
- mostrare la temperatura dell'acqua all'interno del sistema di accumulo.

5.3.7 Sistema di distribuzione

II sistema di distribuzione delle acque meteoriche può operare in tre diversi modi:

- tramite il pompaggio diretto dell'acqua dal serbatoio di accumulo al punto di utilizzo finale;
- attraverso il pompaggio dell'acqua dal serbatoio di accumulo verso un contenitore intermedio, posto in prossimità del punto di utilizzo;
- mediante un sistema di accumulo a gravità, che non prevede l'utilizzo delle pompe.

Le tubazioni per la distribuzione dell'acqua piovana possono essere realizzate con diverse tipologie di materiali, come ad esempio:

- polibutene (PB);
- polietilene reticolato (PE-X);
- multistrato;
- rame;
- acciaio inossidabile;
- polietilene ad alta densità (HOPE);
- polietilene a bassa densità (LOPE);
- policloruro di vinile non plastificato (PVC-U);
- polipropilene random (PPR).

Le tubazioni che compongono la rete di distribuzione devono essere dimensionate in modo tale da assicurare sia un'adeguata portata che una pressione di esercizio tale da ricadere nel corretto range di funzionamento dell'impianto. I sovradimensionamenti possono infatti determinare effetti negativi sulla qualità dell'acqua, a causa della bassa velocità del idrico, mentre le pressioni elevate possono determinare un eccessivo aumento dei consumi.

La normativa richiede che le tubazioni e i raccordi siano progettati in modo da:

- offrire una resistenza adeguata alle pressioni di esercizio dell'intero impianto;
- impedire ogni interconnessione con la rete acquedottistica municipale o con ogni altra possibile fonte di approvvigionamento di acqua potabile;
- prevenire la cattura di aria durante la fase di riempimento, poiché determinerebbe notevoli sprechi d'acqua per effettuarne lo spurgo.

5.3.8 Sistema di alimentazione supplementare

Gli impianti per la raccolta dell'acqua piovana possono essere provvisti di un sistema di alimentazione aggiuntivo, che entra automaticamente in funzione tutte le volte in cui il livello idrico del serbatoio di stoccaggio raggiunge un valore minimo prestabilito: questo sistema ha il compito di garantire un costante approvvigionamento idrico all'impianto domestico, con qualità pari almeno a quella delle acque meteoriche. Nella maggior parte dei casi, soprattutto nei mesi siccitosi, gli impianti di raccolta dell'acqua piovana sono alimentati, anche solo parzialmente, dall'acqua potabile proveniente dalla rete acquedottistica municipale.

L'alimentazione supplementare può essere conseguita per mezzo di:

- un serbatoio addizionale, dotato di una pompa in grado di alimentare le tubazioni per la distribuzione dell'acqua;
- un sistema di accumulo, con alimentazione diretta all'interno dello stesso oppure nelle tubazioni di raccolta delle acque meteoriche;
- un serbatoio di raccolta intermedio, normalmente posizionato nei piani più alti dell'edificio.

II sistema di alimentazione supplementare deve essere provvisto di un'unità di controllo, tale da assicurare che il volume idrico richiesto dall'utenza, non garantito dal sistema di raccolta dell'acqua piovana, non sia superiore a quello necessario per il solo utilizzo immediato.

L'acqua piovana contenuta all'interno del sistema di alimentazione supplementare non deve mai entrare a contatto con l'acqua potabile proveniente dalla rete acquedottistica, poiché tale eventualità determinerebbe un altissimo rischio di contaminazione delle acque potabili: per ovviare a questo problema, la tubazione di alimentazione dell'acqua potabile deve essere installata predisponendo un apposito sistema di protezione antiriflusso. Questo dispositivo deve essere selezionato in maniera opportuna, tenendo in considerazione sia le portate da convogliare che le perdite di carico, nonché le istruzioni di installazione fornite dal produttore; deve inoltre essere posizionato prima della tubazione di alimentazione supplementare e, in ogni caso, a monte del punto a partire dal quale le due erogazioni possono potenzialmente entrare a contatto tra loro.

6. Applicazione della specifica tecnica UNI/TS 11445

L'obiettivo del presente capitolo è quello di effettuare il dimensionamento di due sistemi per la raccolta delle acque piovane, sulla base delle indicazioni fornite dalla norma italiana UNI/TS 11445:2012; l'analisi proseguirà successivamente con il calcolo delle efficienze dei sistemi, sia in termini di soddisfacimento della domanda idrica che di riduzione degli sfiori, e con un'analisi costi-benefici, in modo da valutare la possibile fattibilità economica dell'impianto di approvvigionamento idrico alternativo. La trattazione si focalizzerà su due edifici residenziali ubicati nel territorio del comune di Mondovì, in provincia di Cuneo: per entrambi i casi di studio, lo scopo è quello di confrontare due diverse possibilità, rappresentate la prima dalla sola fornitura idrica garantita dalla rete acquedottistica municipale e l'altra da un approccio integrato, il quale prevede anche l'installazione di un sistema DRWH (Domestic RainWater Harvesting) di raccolta delle acque meteoriche per soddisfare la sola domanda idrica per l'utilizzo dei WC, in modo da comprendere se l'installazione del sistema idrico alternativo può risultare economicamente conveniente per l'utenza.

6.1 Primo caso studio: Edificio condominiale

6.1.1 Caratteristiche dell'edificio oggetto di studio

La tabella sottostante riassume le principali caratteristiche dell'edificio in questione:

Ubicazione	Mondovì (CN)
Numero di piani	3 + piano interrato
Area della copertura	570 m^2
Superficie di ogni piano	540 m^2
Superficie calpestabile di ogni piano	477 m^2
Numero di unità abitative	18
Numero di residenti	37
Gestore del servizio idrico integrato	Mondo Acqua S.p.A.

Tabella 6.1: Caratteristiche dell'edificio preso in esame.

Figura 6.1: Vista esterna dell'edificio.

Il fabbricato presenta tre piani abitativi ed un piano interrato ed è composto di tre scale (A, B e C), in ognuna delle quali sono presenti sei appartamenti, per un totale di 18 unità abitative; di seguito viene riportata la planimetria dei due appartamenti che costituiscono il generico piano di una scala, ognuno dei quali è composto come segue:

- L'appartamento riportato a destra si compone di quattro camere ed un bagno;
- L'appartamento riportato a sinistra si compone invece di tre camere ed un bagno.

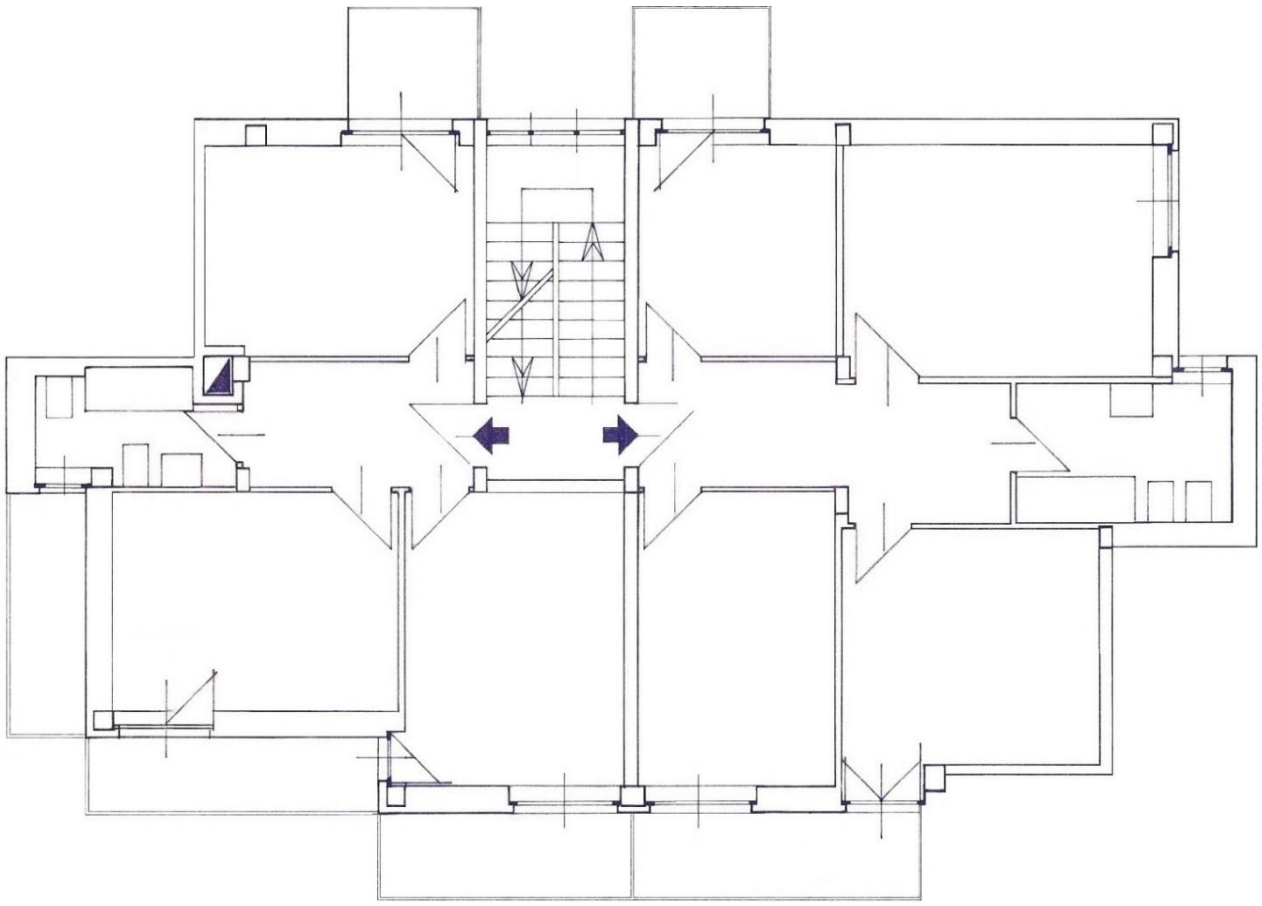

Figura 6.2: Planimetria delle due tipologie di appartamenti del condominio.

6.1.2 Rilevamento dei consumi

La fornitura idrica avviene esclusivamente tramite la rete acquedottistica municipale, pertanto l'edificio è sprovvisto sia un sistema di raccolta dell'acqua piovana che di un sistema per la raccolta e il riutilizzo delle acque di seconda qualità.
Il monitoraggio dei consumi ha avuto una durata complessiva di 28 giorni, in modo da ottenere una maggiore precisione dei dati: considerando infatti un arco temporale più ampio, si riduce conseguentemente l'incertezza dei risultati. Le domande idriche giornaliere sono poi state ripartite, per ogni settimana di monitoraggio, tra i cinque giorni lavorativi e i due giorni festivi, sia per determinare il costo in bolletta relativo ai consumi idrici che per eseguire il dimensionamento del serbatoio per la raccolta delle acque piovane. Lo strumento impiegato per eseguire il rilevamento dei consumi è un contatore a lettura diretta, che costituisce una delle tipologie più moderne e al contempo più diffuse: il consumo d'acqua è espresso in metri cubi su un quadrante meccanico, mentre le quattro lancette rosse sottostanti indicano rispettivamente le centinaia, le decine, le unità e i decimi di litro.

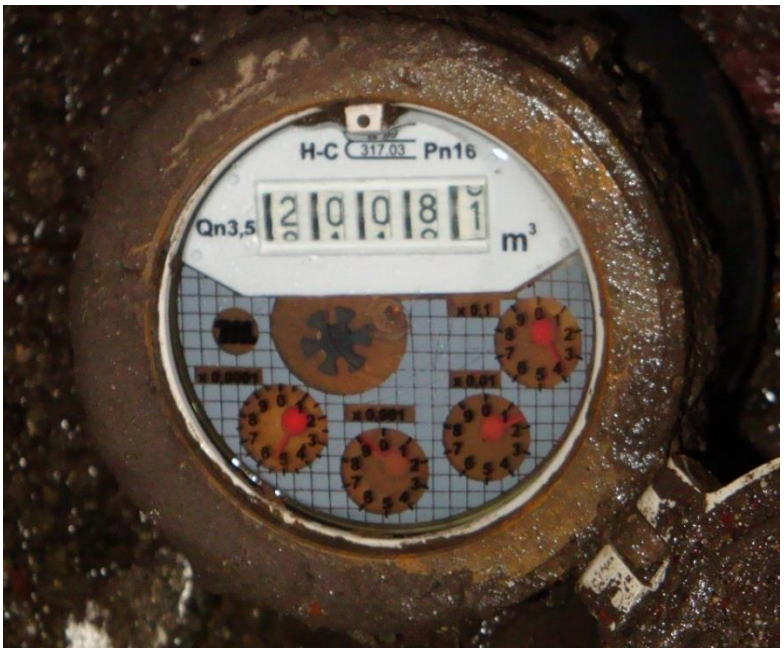

Figura 6.3: Contatore idrico installato in prossimità della strada privata dell'edificio.

Le spese condominiali suddivisibili in funzione dei consumi individuali di ogni appartamento necessitano di strumenti di rilevazione per eseguire tale ripartizione: questo strumento è rappresentato dai cosiddetti contatori individuali, detti anche contatori di sottrazione o misuratori individuali.
In base a quanto stabilito dal Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 4 marzo 1996 "Disposizioni in materia di risorse idriche", pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 14 marzo 1996, n. 62, S.O. e attualmente vigente, ogni unità abitativa è obbligata a dotarsi di un contatore di ripartizione di consumo idrico. La giurisprudenza che si è pronunciata in materia di ripartizione delle spese dell'acqua in ambito condominiale non ha mai affrontato compiutamente l'argomento, limitandosi a

prendere atto del fatto che il Legislatore vede con favore l'adozione di norme finalizzate alla installazione di contatori individuali. Facendo invece riferimento alla ripartizione delle spese condominiali connesse all'uso di acqua potabile sulla base dei consumi, ne dovrebbe discendere la possibilità per i singoli condòmini di agire giudizialmente al fine di ottenere l'adeguamento a quanto previsto dall'Allegato 9 al D.P.C.M. 4 marzo 1996 e non realizzato volontariamente.

Il costo del servizio, come specificato dalla legge, si compone di più voci: la prima è costituita dai costi fissi, ossia il costo della fornitura dell'acqua e, ove presenti, della fognatura e della depurazione. La seconda voce è invece riferita ai costi dei consumi idrici, per i quali sono presi in considerazione il contatore di riferimento dell'ente erogatore e gli eventuali contatori di sottrazione. La suddivisione di questi ultimi costi è eseguita sulla base dei consumi del singolo appartamento, facendo in modo che scattino le relative fasce tariffarie; lo stesso discorso vale anche per le quote inerenti il servizio di fognatura e quello di depurazione, che coincidono con la quota di consumo. In caso di assenza dei contatori di sottrazione e quando al contempo non esistono convenzioni particolari, relativamente al consumo di acqua corrente occorre suddividere il costo tra i condòmini in ragione dei millesimi di proprietà, così come stabilito dall'art. 1123, comma 1, c.c.; al riguardo, una pronuncia resa dal Supremo Collegio ha efficacemente spiegato perché alla suddivisione della spesa per il consumo dell'acqua non può applicarsi l'art. 1123, comma 2, c.c.: il costo della fattura del servizio idrico non può infatti essere ripartito tra i condòmini in base al numero di occupanti ciascuna unità immobiliare, escludendo dalla contribuzione i condòmini i cui appartamenti siano rimasti vuoti nel corso dell'anno.

In definitiva, nei condomini la ripartizione dei costi concernenti il Servizio Idrico Integrato viene effettuata rispetto al valore millesimale del singolo appartamento: questa metodologia è ancora oggi la più diffusa per gli edifici residenziali italiani, in particolar modo per quelli di non recente costruzione, e non giova pertanto al risparmio idrico, in quanto il singolo utente non viene incentivato ad un utilizzo più responsabile della risorsa idrica, essendo quest'ultima ripartita tra tutti i condòmini. Pertanto tutti i dati di consumo che sono stati rilevati si riferiscono alla scala di edificio e sono stati successivamente ripartiti tra tutti i residenti in modo da ottenere il relativo valore medio pro capite.

Nella tabella seguente sono riportate le principali informazioni relative al monitoraggio dei consumi:

Data di inizio delle rilevazioni	18 novembre 2019
Data di fine delle rilevazioni	15 dicembre 2019
Orario di ogni rilevazione	00:00
Tipologia del contatore	Contatore a lettura diretta
Portata nominale	$Q_n = 3{,}5\ m^3 \cdot h^{-1}$
Sensibilità del contatore	$0{,}0001\ m^3$

Tabella 6.2: Dati relativi al monitoraggio dei consumi.

6.1.3 Elaborazione dei dati

I valori dei consumi idrici giornalieri, rilevati nel periodo di tempo compreso tra il 18 novembre e il 15 dicembre 2019 e riportati nella tabella seguente, sono stati ripartiti tra giorni lavorativi e festivi in modo da tenere in considerazione la differenza di domanda idrica che intercorre tra queste due classi, aumentando di conseguenza l'accuratezza dell'analisi. Per ognuna delle due precedenti categorie sono stati poi tracciati gli andamenti temporali dei consumi e la relativa retta interpolante, il cui coefficiente angolare definisce numericamente il consumo idrico giornaliero medio: dividendo infine i due valori ottenuti per il numero dei residenti, si è determinato il consumo idrico giornaliero pro capite.

Data	**Consumi**		**Data**	**Consumi**	
	Totali $\left[m^3\right]$	**Pro capite** $\left[\frac{l}{g \cdot ab}\right]$		**Totali** $\left[m^3\right]$	**Pro capite** $\left[\frac{l}{g \cdot ab}\right]$
18 novembre	5,3784	145,36	2 dicembre	5,3467	144,51
19 novembre	5,5178	149,13	3 dicembre	5,4879	148,32
20 novembre	5,3434	144,42	4 dicembre	5,1604	139,47
21 novembre	5,1758	139,89	5 dicembre	5,2624	142,23
22 novembre	5,2256	141,23	6 dicembre	5,3938	145,78
23 novembre	5,6889	153,75	**7 dicembre**	5,7474	155,34
24 novembre	5,9856	161,77	**8 dicembre**	5,8758	158,81
25 novembre	5,4385	146,99	9 dicembre	5,4168	146,40
26 novembre	5,4893	148,36	10 dicembre	5,2382	141,57
27 novembre	5,2910	143,00	11 dicembre	5,1969	140,46
28 novembre	5,0839	137,40	12 dicembre	5,4376	146,96
29 novembre	5,4416	147,07	13 dicembre	5,3621	144,92
30 novembre	5,7851	156,35	**14 dicembre**	5,8090	157,00
1 dicembre	5,9342	160,38	**15 dicembre**	5,9548	160,94

Tabella 6.3: Consumi idrici giornalieri del condominio.

Nei due grafici seguenti sono diagrammati i consumi pro capite cumulati nei giorni lavorativi e in quelli festivi, con le relative rette interpolanti: essendo il numero dei residenti elevato, la variazione della domanda idrica giornaliera è piccola, quindi i singoli punti giacciono in prossimità della retta.

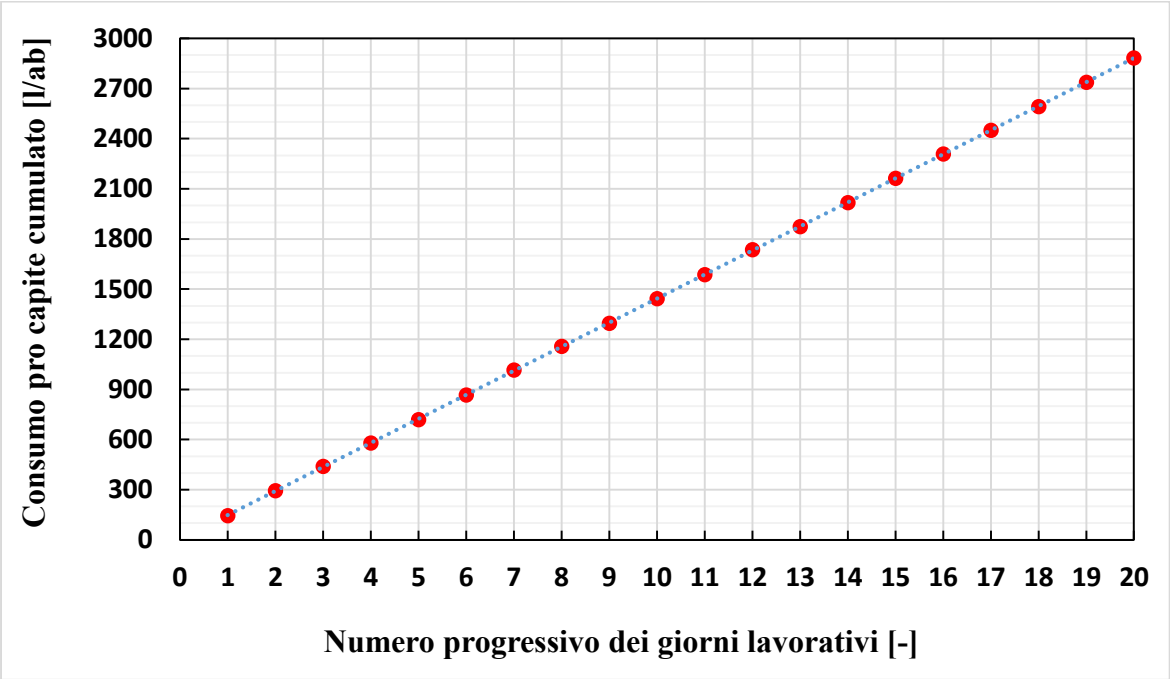

Figura 6.4: Consumi pro capite progressivi nei giorni lavorativi e retta interpolante.

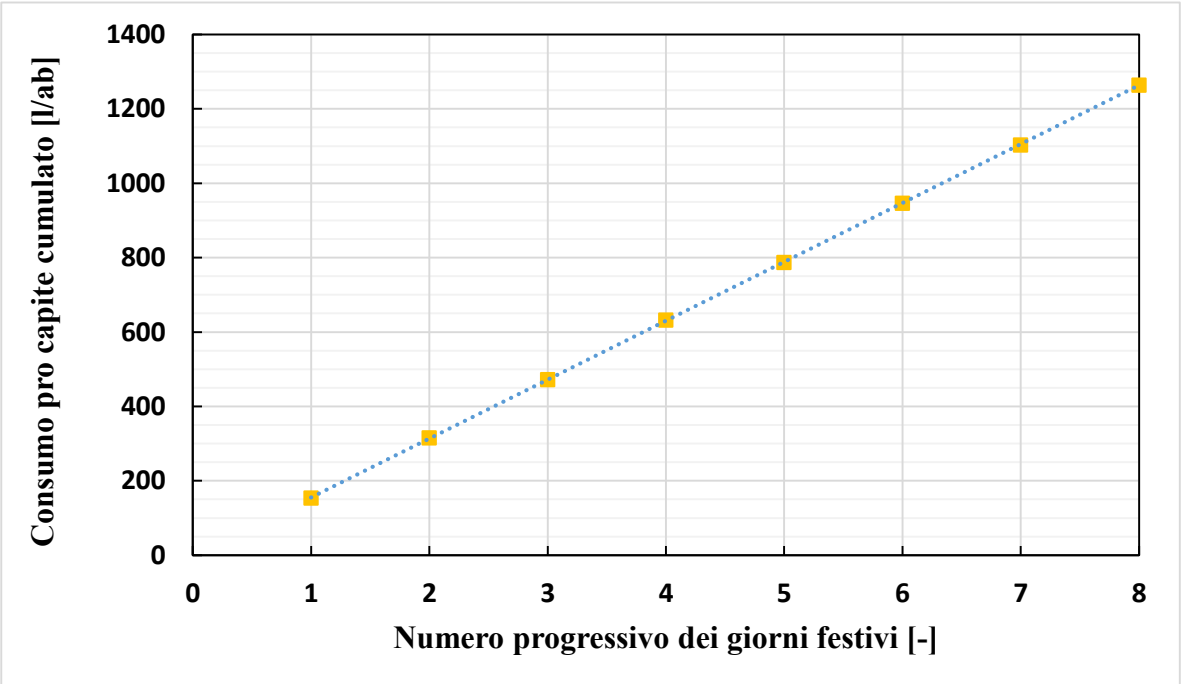

Figura 6.5: Consumi pro capite progressivi nei giorni festivi e retta interpolante.

Complessivamente, la campagna di monitoraggio dei consumi ha fornito i seguenti valori:

- Il consumo medio pro capite di un giorno lavorativo è pari a 144,17 litri;
- Il consumo medio pro capite di un giorno festivo è invece pari a 158,04 litri.

L'incremento dei consumi in un giorno festivo è di 13,87 litri, ossia circa il 9,62% in più rispetto al valore registrato in un giorno lavorativo: questa differenza è stata presa in considerazione in quanto non è trascurabile ed è dovuta al fatto che circa il 50% dell'utenza è costituito da lavoratori e studenti, i quali determinano una fluttuazione della domanda idrica sulle diverse scale temporali: questi risultati indicano che la tipologia di utenza incide notevolmente sull'andamento dei consumi idrici dell'edificio.

Il diagramma seguente ha infine l'obiettivo di raffigurare l'andamento generale della domanda idrica pro capite per tutti i 28 giorni del monitoraggio:

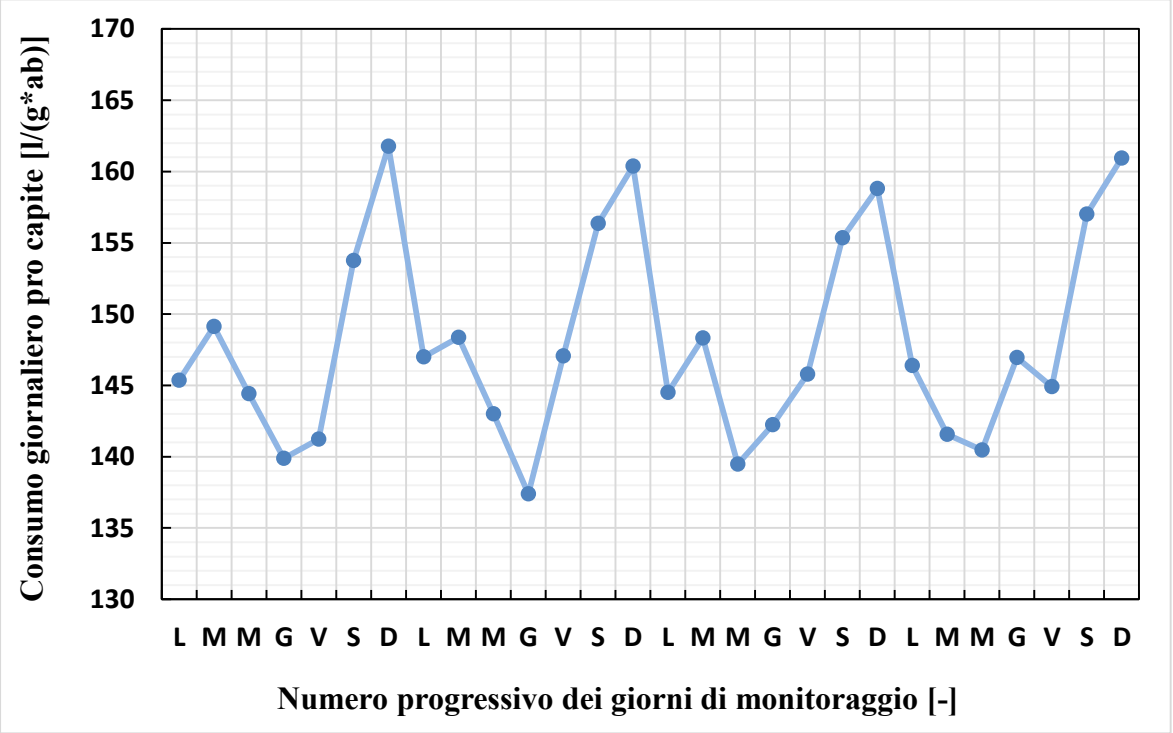

Figura 6.6: Consumi giornalieri pro capite per l'intervallo temporale considerato.

6.1.4 Valutazione economica di un impianto idrico tradizionale

Per determinare la spesa totale annua per l'approvvigionamento idrico garantito esclusivamente dall'utilizzo della rete acquedottistica municipale, è necessario analizzare le varie voci di costo riportate in allegato alla fattura per il Servizio Idrico Integrato del condominio. Le spese annuali per il suddetto servizio vengono ripartite in due quote: la prima presenta per ogni appartamento un valore fisso, calcolato sulla base dei millesimi di proprietà, ed è relativa al solo accesso al servizio; la seconda quota è invece associata ai consumi effettivi e prevede una suddivisione in quattro fasce tariffarie relativamente all'acquedotto, mentre per quanto riguarda sia la fognatura che il servizio di depurazione è invece prevista un'unica quota di spesa.

La tabella sottostante riporta la struttura tariffaria applicata dal gestore del Servizio Idrico Integrato del comune di Mondovì, Mondo Acqua S.p.A., in vigore nell'anno 2019: la prima parte è quella associata ai costi variabili, valutati cioè in funzione dei consumi idrici, mentre la seconda parte prende in considerazione le quote fisse per l'accesso al servizio.

Quote relative al consumo	
Acquedotto, tariffa agevolata (da 0 a 60 m^3 annui)	$0{,}411794 \frac{€}{m^3}$
Acquedotto, tariffa base (da 61 a 180 m^3 annui)	$0{,}653641 \frac{€}{m^3}$
Acquedotto, I eccedenza (da 181 a 220 m^3 annui)	$1{,}960925 \frac{€}{m^3}$
Acquedotto, II eccedenza (oltre 220 m^3 annui)	$2{,}350142 \frac{€}{m^3}$
Tariffa fognatura	$0{,}213161 \frac{€}{m^3}$
Tariffa depurazione	$0{,}461843 \frac{€}{m^3}$
Quote fisse di accesso al servizio	
Quota fissa acquedotto	$15{,}15 \frac{€}{anno}$
Quota fissa fognatura	$4{,}57 \frac{€}{anno}$
Quota fissa depurazione	$9{,}98 \frac{€}{anno}$

Tabella 6.4: Struttura tariffaria applicata per l'anno 2019 a Mondovì [Fonte: Mondo Acqua S.p.A.].

Si è ora in possesso di tutti i dati necessari per valutare il costo complessivo per l'approvvigionamento idrico dalla rete acquedottistica, facendo riferimento ad un intervallo di tempo trentennale. Il costo fisso viene valutato, per ogni unità abitativa, come somma di tre quote fisse relative rispettivamente all'acquedotto, alla fognatura e alla depurazione, come riportato nella formula sottostante:

$$C_{FISSO} = C_{acquedotto} + C_{fognatura} + C_{depurazione}; \tag{6.1}$$

per l'appartamento preso in considerazione, la quota fissa di accesso al servizio vale:

$$C_{FISSO,1} = C_{acquedotto} + C_{fognatura} + C_{depurazione} = 15{,}15 + 4{,}57 + 9{,}98 = 29{,}70 \frac{€}{anno}. \tag{6.2}$$

Per valutare infine il costo fisso per l'intero edificio è necessario considerare i millesimi di proprietà relativi all'unità abitativa presa come riferimento, che appartiene alla categoria di appartamenti con quattro stanze e pertanto caratterizzata da una superficie maggiore, e determinare la quota fissa relativa alla seconda tipologia di appartamenti, che viene calcolata come segue:

$$C_{FISSO,2} = C_{FISSO,1} \cdot \frac{millesimi\ \ dell'appartamento_1}{millesimi\ \ dell'appartamento_2}; \tag{6.3}$$

nel caso in esame, la quota fissa dell'appartamento più piccolo è pari a:

$$C_{FISSO,2} = C_{FISSO,1} \cdot \frac{millesimi\ \ dell'appartamento_1}{millesimi\ \ dell'appartamento_2} = 29{,}70 \cdot \frac{49{,}00}{62{,}11} = 23{,}43 \frac{€}{anno}. \tag{6.4}$$

E' quindi sufficiente moltiplicare le due quote appena ottenute per il relativo numero di unità abitative e sommare successivamente i risultati parziali, come indicato dalla seguente espressione:

$$C_{FISSO,EDIFICIO} = n_1 \cdot C_{FISSO,1} + n_2 \cdot C_{FISSO,2}, \tag{6.5}$$

con:

- n_1: numero di appartamenti con quattro camere e bagno;
- n_2: numero di appartamenti con tre camere e bagno.

Complessivamente, la quota fissa per l'accesso al Servizio Idrico Integrato dell'edificio condominiale è pari a:

$$C_{FISSO,EDIFICIO} = n_1 \cdot C_{FISSO,1} + n_2 \cdot C_{FISSO,2} = 9 \cdot 29{,}70 + 9 \cdot 23{,}43 = 478{,}17 \frac{€}{anno}. \tag{6.6}$$

Per quanto riguarda invece il costo in bolletta associato ai consumi, considerando sempre un intervallo temporale di 30 anni, occorre esprimere innanzitutto il volume annuo della domanda idrica: essa è stata calcolata a partire dai consumi pro capite, ottenuti come risultato del monitoraggio. Quest'ultimo

aveva fornito un valore pari a 144,17 litri per i giorni lavorativi e 158,04 litri per quelli festivi, il cui numero medio in un anno ammonta rispettivamente a 253 e 112. A partire dal consumo idrico annuo totale, valutato per i 37 residenti dell'edificio, è possibile determinare i relativi valori per le due tipologie di unità abitativa, calcolati in funzione dei millesimi di proprietà; le tre espressione seguenti riportano la procedura applicata:

$$V = 37 \cdot (253 \cdot 144{,}17 + 112 \cdot 158{,}04) = 2.004{,}475 m^3; \quad (6.7)$$

$$V_{APPARTAMENTO\ GRANDE} = 2.004{,}475 \cdot \frac{62{,}11}{1.000} = 124{,}498 m^3; \quad (6.8)$$

$$V_{APPARTAMENTO\ PICCOLO} = 2.004{,}475 \cdot \frac{49{,}00}{1.000} = 98{,}219 m^3. \quad (6.9)$$

Noti i volumi idrici annui prelevati da entrambe le categorie di appartamento, vengono quindi ricavati i relativi costi annui: facendo riferimento al tariffario idrico riportato in tabella 3.4, risulta evidente che tutti i 18 appartamenti rientrano, relativamente ai soli prelievi dalla rete acquedottistica, nella fascia tariffaria base (fascia 2), essendo i consumi annui compresi tra 61 m^3 e 180 m^3 annui.
Le due formule seguenti riportano i costi annui per le due tipologie di unità abitativa; questi importi sono per loro natura variabili, in quanto si basano sui volumi annui prelevati, e vengono calcolati per mezzo di una sommatoria a scaglioni, fondata sulle diverse fasce tariffarie:

$$C_{APPARTAMENTO\ GRANDE,ACQUEDOTTO} = 60 \cdot 0{,}411794 + 64{,}498 \cdot 0{,}653641 = 66{,}87€; \quad (6.10)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ PICCOLO,ACQUEDOTTO} = 60 \cdot 0{,}411794 + 38{,}219 \cdot 0{,}653641 = 49{,}69€. \quad (6.11)$$

E' ora sufficiente moltiplicare i valori ottenuti per il relativo numero di unità abitative e sommare poi i due risultati parziali, determinando il costo annuo per il solo prelievo dalla rete acquedottistica:

$$C_{VARIABILE\ TOTALE,ACQUEDOTTO} = 9 \cdot 66{,}87 + 9 \cdot 49{,}69 = 1049{,}04€. \quad (6.12)$$

Per ottenere il costo complessivo associato ai consumi è poi necessario prendere anche in considerazione le componenti riferite rispettivamente allo scarico nella rete fognaria e al sistema di depurazione delle acque reflue; a differenza della precedente quota, in questo caso le tariffe sono prive di un tariffario idrico a scaglioni e valgono rispettivamente:

$$C_{APPARTAMENTO\ GRANDE,FOGNATURA} = 124{,}498 \cdot 0{,}213161 = 26{,}54€; \quad (6.13)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ PICCOLO,FOGNATURA} = 98{,}219 \cdot 0{,}213161 = 20{,}94€; \quad (6.14)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ GRANDE,DEPURAZIONE} = 124{,}498 \cdot 0{,}461843 = 57{,}50€; \quad (6.15)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ PICCOLO,DEPURAZIONE} = 98{,}219 \cdot 0{,}461843 = 45{,}36€. \quad (6.16)$$

I costi variabili totali associati alle immissioni nella rete fognaria e alla depurazione valgono pertanto:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,FOGNATURA} = 9 \cdot 26{,}54 + 9 \cdot 20{,}94 = 427{,}32€\,; \tag{6.17}$$

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,DEPURAZIONE} = 9 \cdot 57{,}50 + 9 \cdot 45{,}36 = 925{,}74€\,. \tag{6.18}$$

In conclusione, il costo variabile complessivo associato all'intero condominio viene calcolato come somma delle tre componenti che fanno riferimento ai consumi idrici prelevati dalla rete acquedottistica, alle immissioni nella rete fognaria e ai volumi trattati dal sistema di depurazione, come indicato nella relazione seguente:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE} = 1{.}049{,}04 + 427{,}32 + 925{,}74 = 2{.}402{,}10€\,. \tag{6.19}$$

Il costo totale per l'anno 2019 è infine espresso dalla somma della quota fissa e di quella variabile:

$$C_{TOTALE,2019} = C_{FISSO\ TOTALE} + C_{VARIABILE\ \ TOTALE} = 478{,}17 + 2{.}402{,}10 = 2{.}880{,}27€\,. \tag{6.20}$$

Considerando inoltre l'I.V.A. pari a 10% dell'imponibile, emerge che il costo complessivo relativamente all'anno 2019 è pari a:

$$C_{TOTALE+I.V.A.,2019} = 1{,}10 \cdot 2{.}880{,}27 = 3{.}168{,}30€\,. \tag{6.21}$$

Per effettuare una valutazione della possibile convenienza economica del sistema RWH, è necessario confrontare il costo complessivo associato all'impianto idrico tradizionale con quello riferito alla contemporanea presenza della rete acquedottistica e di un sistema per la raccolta delle acque piovane: questo confronto viene esteso alla vita utile del serbatoio, supposta pari a 30 anni. Sotto l'ipotesi che i consumi idrici dell'edificio e il suo numero di residenti siano costanti per tutta la durata dell'analisi, si ripete la procedura precedentemente descritta per la valutazione del costo annuo complessivo anche per i nove anni precedenti, ottenendo i seguenti risultati:

Anno	Costo totale annuo [€]	Anno	Costo totale annuo [€]
2010	2˙293,58	2015	2˙826,65
2011	2˙062,86	2016	3˙020,19
2012	2˙062,86	2017	2˙908,72
2013	2˙652,90	2018	3˙168,30
2014	2˙652,90	2019	3˙168,30

Tabella 6.5: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% per il decennio 2010-2019.

I valori ottenuti mettono in evidenza un notevole incremento dei costi totali nel periodo 2010-2019: questo è dovuto sia alla crescita dei costi fissi $[€/anno]$, relativi all'approvvigionamento idrico, che di quelli variabili, associati invece ai consumi $[€/(m^3 \cdot anno)]$.

I precedenti risultati sono diagrammati nel grafico seguente, in cui viene riportata anche la retta interpolante, di equazione:

$$y = 127{,}97 \cdot x + 1'977{,}90, \tag{6.22}$$

dove la variabile indipendente x indica l'anno di riferimento, mentre la variabile dipendente y esprime invece il costo totale annuo relativo all'intero edificio residenziale preso in esame. In particolare, il coefficiente angolare della reta esprime il concetto che l'incremento medio del costo annuo è di poco inferiore a 128 €.

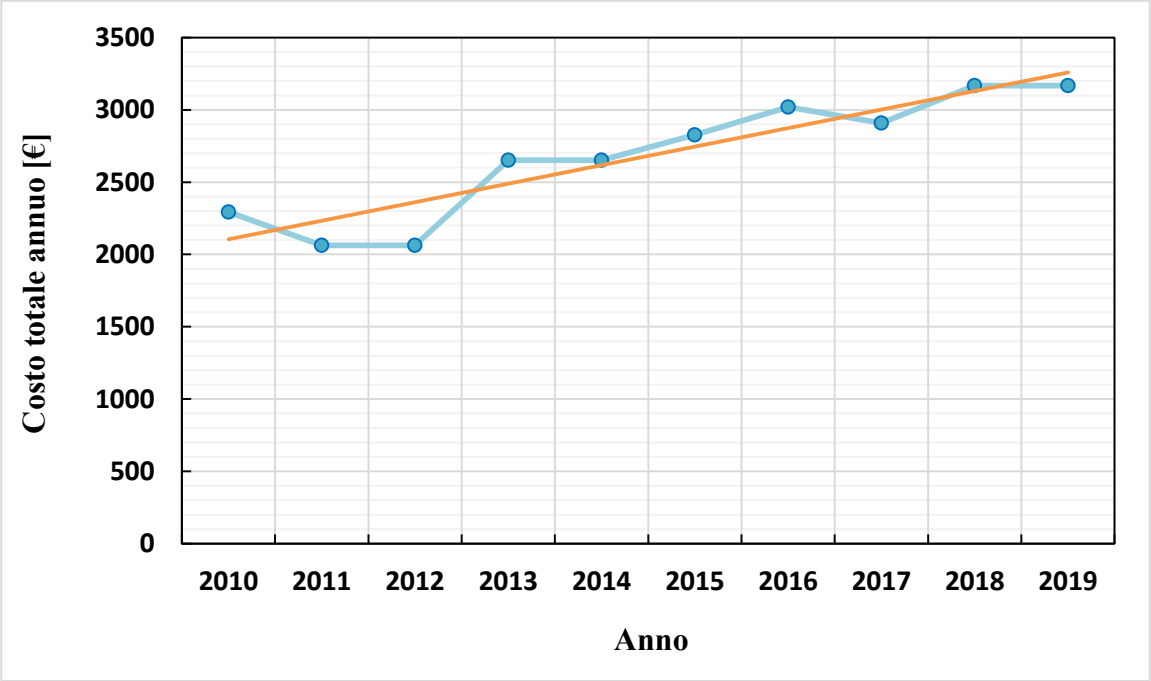

Figura 6.7: Costi totali annui per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica.

L'equazione della retta interpolante è di fondamentale importanza per determinare i costi totali annui nell'intero l'intervallo di riferimento, ossia il trentennio 2019-2048: sfruttando infatti la precedente equazione, è possibile risalire ai singoli costi annui e di conseguenza al costo totale, che verrà in seguito confrontato con quello associato ad un sistema idrico a doppio impianto, il quale prevede l'approvvigionamento idrico sia dalla rete acquedottistica che da un sistema per la captazione delle acque meteoriche.

Nella tabella seguente sono riportati i singoli costi annui:

Anno	Costo [€]	Anno	Costo [€]
2019	3˙168,30	2034	5˙177,15
2020	3˙385,57	2035	5˙305,12
2021	3˙513,54	2036	5˙433,09
2022	3˙641,51	2037	5˙561,06
2023	3˙769,48	2038	5˙689,03
2024	3˙897,45	2039	5˙817,00
2025	4˙025,42	2040	5˙944,97
2026	4˙153,39	2041	6˙072,94
2027	4˙281,36	2042	6˙200,91
2028	4˙409,33	2043	6˙328,88
2029	4˙537,30	2044	6˙456,85
2030	4˙665,27	2045	6˙584,82
2031	4˙793,24	2046	6˙712,79
2032	4˙921,21	2047	6˙840,76
2033	5˙049,18	2048	6˙968,73

Tabella 6.6: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% previsti per il trentennio 2019-2048.

I costi annui possono essere visualizzati nel diagramma sottostante:

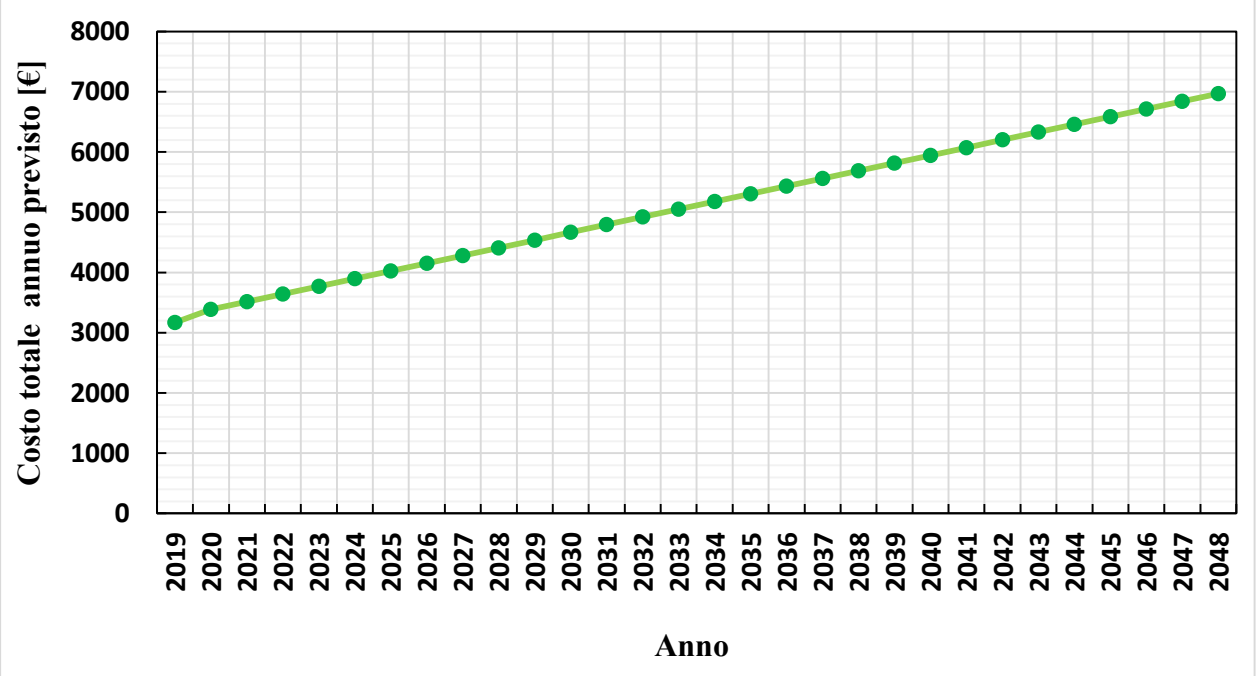

Figura 6.8: Costi totali annui previsti per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica.

Il costo totale da corrispondere al gestore del Servizio Idrico Integrato, ottenuto dalla sommatoria dei singoli costi annui, è quindi pari a:

$$C_{TOTALE,SERVIZIO\ IDRICO} = \sum_{i=1}^{30} C_i = 153.305{,}65€ . \qquad (6.23)$$

6.1.5 Progettazione di un serbatoio per la raccolta delle acque piovane

Per ridurre i prelievi idrici dalla rete acquedottistica municipale è possibile realizzare strategie alternative: le possibili soluzioni sono costituite dalla raccolta delle acque piovane, dal riciclaggio delle acque grigie o ancora da una combinazione delle due precedenti metodologie. Di seguito verrà valutata l'installazione di un sistema RainWater Harvesting per la captazione e il successivo stoccaggio delle acque meteoriche: tra le possibili alternative, è stata considerata questa casistica in quanto non è solamente la soluzione più economica ma anche quella più tecnicamente praticabile, essendo stata interamente analizzata ormai da diversi anni.
La normativa italiana UNI/TS 11445:2012 "Impianti per la raccolta e utilizzo dell'acqua piovana per usi diversi dal consumo umano - Progettazione, installazione e manutenzione", entrata in vigore il 24 maggio 2012, rappresenta il riferimento italiano per quanto riguarda la raccolta delle acque meteoriche in appositi serbatoi di stoccaggio. La normativa definisce i requisiti generali relativi alla progettazione, alla realizzazione, all'esercizio e alla manutenzione, in ambito residenziale e similare, degli impianti destinati al recupero dell'acqua piovana per usi diversi dal consumo umano; tali impianti devono necessariamente essere dotati di una rete di distribuzione interna, detta rete duale, separata dalla rete di distribuzione dell'acqua destinata all'uso umano. La specifica tecnica esplicita inoltre che l'acqua piovana a cui si fa riferimento può essere raccolta e riutilizzata per altri scopi, quali l'irrigazione dei giardini, lo scarico cassette WC, gli impianti di lavaggio delle superfici di pertinenza e altri usi non potabili consentiti dalla legislazione vigente.

La norma prevede due metodologie per eseguire il dimensionamento della cisterna di raccolta delle acque meteoriche: il metodo analitico e quello semplificato; nel presente paragrafo verrà applicato il procedimento semplificato, in quanto il metodo analitico richiede la conoscenza dei dati giornalieri, orari o sub-orari di pioggia e di domanda idrica, che non sono disponibili per il sito in esame. Per valutare l'altezza media annua di pioggia si prendono in considerazione i valori riportati sul sito internet dell'Arpa Piemonte (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale), che ha monitorato nell'intervallo di tempo compreso tra il 1951 e 1990, con riferimento alla città di Mondovì, un'altezza media annua di precipitazione pari a 889 mm. I valori ottenuti, seppur non recenti, sono estremamente significativi poiché si riferiscono ad un intervallo di tempo superiore al valore minimo di 30 anni richiesto dalla normativa italiana UNI/TS 11445:2012.

Il volume meteorico annuo (Q) potenzialmente stoccabile nella cisterna di raccolta dell'edificio viene calcolato con la seguente equazione:

$$Q = \varphi \cdot P \cdot A\,, \tag{6.24}$$

con:

- $\varphi = 0{,}8$: coefficiente di afflusso della copertura, determinato sulla base delle indicazioni fornite dalla specifica tecnica UNI/TS 11445:2012 con i seguenti quattro valori di riferimento:

Tipologia di copertura	$\varphi\,[-]$
Copertura impermeabile a falda	0,8
Copertura impermeabile piana	0,7
Copertura permeabile (es: verde pensile)	0,5
Superficie impermeabile a terra	0,7

Tabella 6.7: Valori del coefficiente di afflusso φ.

- $P = 889mm$: altezza di pioggia media annua, ottenuta dalle rilevazioni eseguite dalla stazione pluviometrica più vicina; il precedente valore fa riferimento alle precipitazioni totali e non considera quindi di deviare dal serbatoio le acque di prima pioggia. La tabella seguente riporta i valori mensili e annui che sono stati rilevati dall'Arpa Piemonte:

Mese	**G**	**F**	**M**	**A**	**M**	**G**	**L**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**Totale**
Altezza di pioggia $[mm]$	43	57	85	98	107	77	*40*	56	62	99	100	65	889
Giorni piovosi	8	9	10	10	9	8	7	6	8	7	6	5	93

Tabella 6.8: Piogge medie mensili ed annue e numero di giorni piovosi (1951-1990) [Fonte: Arpa Piemonte].

- $A = 570m^2$: area della proiezione orizzontale della superficie di captazione.

Inserendo questi valori nella precedente relazione, si ricava il volume potenziale di acqua piovana captabile dalla copertura dell'edificio:

$$Q = \varphi \cdot P \cdot A = 0{,}8[-] \cdot 889[mm] \cdot 570[m^2] = 405{,}384m^3\,. \tag{6.25}$$

La domanda idrica per utilizzi diversi dal consumo umano viene anch'essa determinata sfruttando la normativa italiana UNI/TS 11445:2012, la quale propone varie soluzioni; nella presente analisi si considera l'opzione più realistica, in quanto trae spunto dai consumi idrici reali. Il volume utilizzato per ricaricare la vaschetta del WC è pertanto calcolato come il 30% del fabbisogno annuo reale, come si può osservare anche nell'immagine seguente:

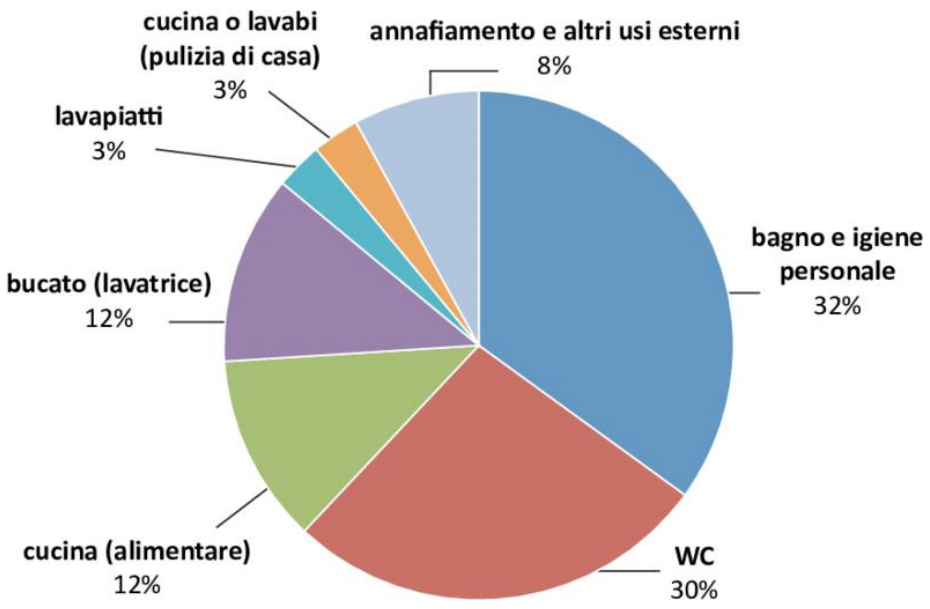

Figura 6.9: Ripartizione dei consumi idrici per usi domestici [Fonte: www.minambiente.it].

Considerando che un anno medio si compone di 253 giorni lavorativi e 112 giorni festivi e tenendo presente che il consumo idrico medio pro capite, ottenuto dai risultati del monitoraggio, è pari a 144,17 litri per i giorni lavorativi e 158,04 litri per quelli festivi, la domanda idrica annua per la ricarica dello sciacquone è calcolata sulla base delle due relazioni di seguito riportate:

$$D_{PRO\ CAPITE} = 0{,}3 \cdot (144{,}17 \cdot 253 + 158{,}04 \cdot 112) = 0{,}3 \cdot 54{,}176 = 16{,}253 m^3, \qquad (6.26)$$

$$D = D_{PRO\ CAPITE} \cdot n^{\circ} residenti = 16{,}253 \cdot 37 = 601{,}361 m^3. \qquad (6.27)$$

I valori ottenuti permettono di osservare che la precedente frazione della domanda idrica domestica (D) è superiore di circa il 50% rispetto all'afflusso meteorico medio annuo (Q): questo determinerà, come si potrà evincere successivamente, una parziale limitazione del rendimento del sistema.

Il dimensionamento del sistema di stoccaggio delle acque meteoriche si basa sul confronto diretto tra l'afflusso meteorico medio annuo (Q) e la domanda idrica annua per usi non potabili (D): il primo parametro da determinare è il volume utile (V_u) del serbatoio, calcolato in funzione del numero

massimo di giorni siccitosi consecutivi. Quando però, come nel caso in esame, tale numero non è disponibile, il volume utile è assunto pari al 6% del valore minimo tra Q ed D; la precedente percentuale corrisponde a 22 giorni consecutivi siccitosi, dato che rispecchia la pluviometria della zona oggetto di studio:

$$V_u = 0{,}06 \cdot \min(Q; D) = 0{,}06 \cdot \min(405{,}384;\ 601{,}361) = 0{,}06 \cdot 405{,}384 = 24{,}323 m^3 . \quad (6.28)$$

Il volume ottimale (V_o) della cisterna è infine ottenuto correggendo il precedente valore per mezzo di un coefficiente di sicurezza adimensionale (C_s), pari a 1,50; il suo scopo è quello di garantire un notevole rendimento del sistema anche in presenza di variazioni significative dei regimi pluviometrici e delle modalità di impiego della risorsa idrica:

$$V_o = V_u \cdot C_s = 24{,}323 \cdot 1{,}50 = 36{,}489 m^3 . \quad (6.29)$$

Siccome il precedente valore non corrisponde a nessun serbatoio disponibile in commercio, è stata selezionata la cisterna con la capacità immediatamente superiore: tale valore è pari a 37,800 m^3 ed è fornito dall'azienda italiana Rototec S.p.A; la migliore dislocazione della cisterna è quella in posizione interrata, data la notevole disponibilità di spazio nel cortile interno del condominio.

6.1.6 Simulazione numerica del bilancio idrico

Prima di eseguire la valutazione di fattibilità economica del sistema RWH, verrà determinata l'efficienza dello stesso; il bilancio idrico del serbatoio, per ogni mese dell'analisi, può essere effettuato previa conoscenza dei seguenti parametri di input:

- l'altezza di pioggia media mensile è stata fornita dalle osservazioni puntuali pubblicate sul sito internet dell'Arpa Piemonte;
- l'afflusso meteorico mensile è stato ricavato con la relazione: $Q_{MENSILE} = \varphi \cdot P \cdot A$;
- la domanda idrica mensile $(D_{MENSILE})$ è ipotizzata costante ed è quindi ottenuta dividendo la domanda idrica annua (D) per i 12 mesi dell'anno, ottenendo il seguente valore medio:

$$D_{MENSILE} = \frac{D}{12} = \frac{601{,}361}{12} = 50{,}113 m^3 ; \quad (6.30)$$

- il bilancio idrico mensile $(B_{MENSILE})$ si ottiene sottraendo all'afflusso meteorico mensile $(Q_{MENSILE})$ la domanda idrica mensile $(D_{MENSILE})$, come espresso dalla seguente equazione:

$$B_{MENSILE} = (Q - D)_{MENSILE}; \tag{6.31}$$

- il volume idrico recuperato mensilmente $(V_{R,MENSILE})$ è pari al valore minimo tra la domanda mensile $(D_{MENSILE})$ e l'afflusso meteorico mensile $(Q_{MENSILE})$ e permette di valutare il risparmio idrico garantito dal sistema RWH per soddisfare la domanda di acqua per usi diversi dal consumo umano:

$$V_{R,MENSILE} = \min(Q_{MENSILE}, D_{MENSILE}). \tag{6.32}$$

In questo caso, essendo l'afflusso meteorico mensile $(Q_{MENSILE})$ sempre inferiore alla domanda idrica mensile $(D_{MENSILE})$, si realizzerà l'uguaglianza:

$$V_{R,MENSILE} = Q_{MENSILE}. \tag{6.33}$$

Mese	**Altezza di pioggia** $h\,[mm]$	**Afflusso meteorico** $Q\,[m^3]$	**Domanda idrica** $D\,[m^3]$	**Bilancio idrico** $B\,[m^3]$	**Volume idrico recuperato** $V_R\,[m^3]$
Gennaio	43	19,608	50,113	-30,505	19,608
Febbraio	57	25,992	50,113	-24,121	25,992
Marzo	85	38,760	50,113	-11,353	38,760
Aprile	98	44,688	50,113	-5,425	44,688
Maggio	107	48,792	50,113	-1,321	48,792
Giugno	77	35,112	50,113	-15,001	35,112
Luglio	40	18,240	50,113	-31,873	18,240
Agosto	56	25,536	50,113	-24,577	25,536
Settembre	62	28,272	50,113	-21,841	28,272
Ottobre	99	45,144	50,113	-4,969	45,144
Novembre	100	45,600	50,113	-4,513	45,600
Dicembre	65	29,640	50,113	-20,473	29,640
Totale	889	405,384	601,361	-195,977	405,384

Tabella 6.9: Bilancio idrico mensile e annuo del sistema RWH in studio.

Come si evince dalla precedente tabella, il bilancio idrico (B) del serbatoio presenta valori negativi per ogni mese dell'anno: questi risultati indicano che la cisterna non sarà mai in grado di soddisfare totalmente la domanda idrica dell'utenza dell'edificio. Il mese caratterizzato dal bilancio idrico più

sfavorevole è luglio, in quanto il volume delle acque piovane $(Q_{MENSILE})$ captate dalla copertura e quindi stoccate nella cisterna è tale da soddisfare solamente il 36,40% della domanda idrica mensile per gli utilizzi diversi dal consumo umano $(D_{MENSILE})$; il picco di efficienza è invece conseguito nel mese di maggio, per il quale l'afflusso meteorico raggiunge i valori massimi e per cui il 97,36% della domanda idrica è pertanto garantita dalle acque piovane. Essendo il bilancio della cisterna negativo per tutti i mesi dell'anno, occorrerà sempre avvalersi della rete acquedottistica municipale per coprire completamente la domanda idrica. Una possibile modalità in grado di determinare un bilancio idrico annuo positivo sarebbe un aumento dell'afflusso meteorico, situazione però attuabile solo se l'installazione del sistema RWH avvenisse in territori caratterizzati da regimi pluviometrici più intensi; un'altra procedura consiste invece nella riduzione dei consumi, garantita con l'installazione di appositi dispositivi di risparmio idrico o di sistemi per il riciclaggio delle acque grigie.

Come osservato precedentemente, poiché la domanda idrica mensile non viene mai soddisfatta interamente, il volume idrico recuperato $(V_{R,MENSILE})$ grazie all'adozione del sistema RWH, riportato nell'ultima colonna della tabella 3.8, coinciderà sempre con l'afflusso meteorico mensile $(Q_{MENSILE})$; inoltre, essendo la domanda idrica sempre superiore all'afflusso meteorico, tutta l'acqua intercettata annualmente dalla copertura, pari a 405,384 m^3, è utilizzata completamente ed è quindi tale da inibire sempre la condizione di sfioro dal serbatoio: il precedente costituisce uno dei due vantaggi quantificabili grazie all'installazione del sistema RWH. Il secondo e ultimo beneficio è invece rappresentato dalla totale assenza degli sfiori nella rete fognaria. Occorre però sottolineare che questi risultati fanno riferimento alla scala temporale mensile, presa come riferimento dalla norma tecnica italiana UNI/TS 11445:2012: essi potrebbero quindi essere smentiti oppure confermati considerando invece una scala sub-mensile, come ad esempio quella giornaliera oppure quella oraria.

Per valutare analiticamente il rendimento del sistema si utilizzano i due seguenti parametri funzionali:

- Indice di efficienza idrica, detto anche Water Saving o Affidabilità Volumetrica, che consente di valutare l'efficienza del risparmio annuale in base alla formulazione sottostante:

$$W_S = \frac{Volume\ idrico\ annuo\ recuperato}{Domanda\ idrica\ annua} \cdot 100 = \frac{V_R}{D} \cdot 100 = \frac{405{,}384}{601{,}361} \cdot 100 = 67{,}41\%. \qquad (6.34)$$

Il valore ottenuto fa sì che il sistema RWH in progetto ricada all'interno della Classe di Efficienza Idrica B, garantendo pertanto un notevole risparmio idrico. Questo risultato dimostra che la cisterna è in grado di soddisfare oltre i $2/3$ della domanda idrica annua per usi diversi dal consumo umano (D): ricordando infatti che quest'ultimo volume era stato valutato come il 30% della domanda idrica totale dell'edificio, si può evincere che il sistema RWH in esame è tale da ridurre la richiesta di acqua garantita dalla rete acquedottistica di un valore pari al 20,22%.

La precedente percentuale è ottenuta come indicato nella formula sottostante:

$$Riduzione\ \ della\ \ domanda\ \ idrica\ \ totale = 0{,}6741 \cdot 30\% = 20{,}22\% . \qquad (6.35)$$

Di seguito sono elencate le cinque Classi di Efficienza Idrica previste dalla norma italiana UNI/TS 11445:2012:

Indice di efficienza idrica	Classe di efficienza
$80 \le W_S \le 100$	A
$60 \le W_S \le 79$	B
$40 \le W_S \le 59$	C
$20 \le W_S \le 39$	D
$0 \le W_S \le 19$	E

Tabella 6.10: Scala delle Classi di Efficienza Idrica.

- Indice di riduzione dello sfioro, espresso come il complementare del cosiddetto overflow, ossia del volume annuo scaricato per troppopieno nella rete fognaria (O_F); quest'ultimo è calcolato per mezzo della seguente espressione:

$$O_F = \left(\frac{Afflusso\ \ annuo - Volume\ \ recuperato}{Afflusso\ \ annuo} \right) \cdot 100 = \left(\frac{405{,}384 - 405{,}384}{405{,}384} \right) \cdot 100 = 0\% . \qquad (6.36)$$

E' quindi sufficiente determinare l'indice di riduzione dello sfioro come:

$$100 - O_F = 100 - 0 = 100\% . \qquad (6.37)$$

Questo risultato esprime il totale annullamento dei deflussi nella rete fognaria, in quanto la cisterna è stata dimensionata in modo tale da immagazzinare completamente il volume dell'acqua piovana precipitata durante tutti gli eventi meteorici verificatisi nel corso dell'anno pluviometrico medio.

6.1.7 Valutazione economica di un sistema a doppio impianto

Per stabilire la possibile convenienza economica relativa all'installazione di un sistema RWH, occorre confrontare l'importo totale per l'approvvigionamento idrico dalla rete acquedottistica municipale con i costi complessivi associati ad un sistema a doppio impianto, che prevede l'installazione di un serbatoio aggiuntivo per la raccolta delle acque piovane. Di seguito saranno quindi valutati gli oneri totali associati all'installazione di una cisterna, la cui vita utile è trentennale, in modo da confrontarli direttamente, sulla medesima scala temporale, con quelli ottenuti precedentemente in relazione al solo approvvigionamento idrico dall'acquedotto. Il costo complessivo è definito dalla somma di una quota fissa, associata alla costruzione e alla manutenzione del sistema RWH, e di una quota variabile, che è invece funzione del volume aggiuntivo di acqua di rete necessario per soddisfare l'intera domanda idrica dell'utenza.

Complessivamente, il dimensionamento del serbatoio di raccolta delle acque meteoriche, di cui al paragrafo 3.5, ha condotto ad un volume pari a 37,800 m^3; la soluzione più idonea al caso in esame è riportata nella figura seguente:

Articolo	Volu. utile lt.	Lung. mt	Larg. mt	Alt. mt	Moduli base				N° Ispezioni standard	N° Ispezioni optional	Prolunghe	Saldatura in cantiere	Prezzo €
					TS 7500	CN 7000	CR 7000	TE 8500					
IT 36000	37800	12,4	2,1	2,2	2	3	-	-	2	3	PP77	-	17200,00

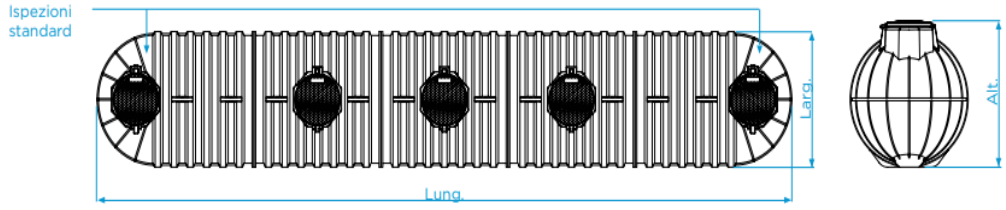

Figura 6.10: Caratteristiche, prezzo e forma della cisterna oggetto di studio [Fonte: www.rototec.it].

Il costo fisso viene valutato, per ogni unità abitativa, come la somma di tre quote fisse relative all'acquedotto, alla fognatura e alla depurazione e ammonta, per l'intero condominio, a 478,17 € relativamente all'anno 2019: tale valore è identico a quello precedentemente ottenuto in assenza del serbatoio per la raccolta delle acque piovane, poiché è indipendente dai consumi dell'utenza.

Per quanto riguarda invece i costi distribuiti, essi sono associati sia al fabbisogno idrico di acqua potabile garantito esclusivamente dall'acquedotto e pari al 70% della domanda complessiva (sulla base delle indicazioni della specifica tecnica UNI/TS 11445:2012), che alla domanda idrica per utilizzi diversi dal consumo umano non soddisfatta dal serbatoio di stoccaggio.

Complessivamente, il volume richiesto alla rete acquedottistica ammonta al 79,78% della domanda idrica complessiva: il precedente valore, sulla base della formulazione sottostante, è calcolato sommando il 70% del fabbisogno idrico annuo, garantito esclusivamente dall'acquedotto, con il restante 9,78%, ottenuto dal confronto tra il volume idrico annuo recuperato (V_R) e la domanda idrica annua (D):

$$Percentuale\ H_2O\ fornita\ da\ acquedotto = 70\% + \left(\frac{601{,}361 - 405{,}384}{601{,}361} \cdot 30\%\right) = 79{,}78\%. \quad (6.38)$$

La prima grandezza da determinare è il volume annuo della domanda idrica da acquedotto, calcolato a partire dai consumi pro capite; in particolare:

- Il consumo medio pro capite di un giorno lavorativo è pari a: $0{,}7978 \cdot 144{,}17 = 115{,}02$ litri;
- Il consumo medio pro capite di un giorno festivo è invece pari a: $0{,}7978 \cdot 158{,}04 = 126{,}08$ litri.

Considerando un intervallo temporale di 30 anni e ricordando che il numero medio di giorni lavorativi e festivi in un anno ammonta rispettivamente a 253 e 112, è possibile determinare il consumo idrico annuo totale per i 37 residenti dell'edificio; esso consente di calcolare la domanda annua delle due tipologie di unità abitativa in funzione dei millesimi di proprietà.

Le tre espressione seguenti riportano la procedura applicata:

$$V = 37 \cdot (253 \cdot 115{,}02 + 112 \cdot 126{,}08) = 1.599{,}175 m^3; \quad (6.39)$$

$$V_{APPARTAMENTO\ GRANDE} = 1.599{,}175 \cdot \frac{62{,}11}{1.000} = 99{,}325 m^3; \quad (6.40)$$

$$V_{APPARTAMENTO\ PICCOLO} = 1.599{,}175 \cdot \frac{49{,}00}{1.000} = 78{,}360 m^3. \quad (6.41)$$

A partire dai volumi idrici annui prelevati da entrambe le categorie di appartamenti, vengono di conseguenza ricavati i relativi costi annui: noto il tariffario idrico riportato in tabella 3.4, risulta evidente che tutti i 18 appartamenti rientrano, nonostante l'introduzione del sistema RWH, nella fascia tariffaria base (fascia 2), essendo i consumi annui compresi tra 61 m^3 e 180 m^3 annui.
Le due formule seguenti riportano i costi annui per le due tipologie di unità abitative; questi importi vengono calcolati per mezzo di una sommatoria a scaglioni, fondata sulle diverse fasce tariffarie:

$$C_{APPARTAMENTO\ GRANDE, ACQUEDOTTO} = 60 \cdot 0{,}411794 + 39{,}325 \cdot 0{,}653641 = 50{,}41€; \quad (6.42)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ PICCOLO, ACQUEDOTTO} = 60 \cdot 0{,}411794 + 18{,}360 \cdot 0{,}653641 = 36{,}71€. \quad (6.43)$$

E' ora sufficiente moltiplicare i due valori appena ottenuti per il relativo numero di unità abitative e sommare poi i due risultati parziali, determinando il costo annuo associato al solo prelievo dalla rete acquedottistica:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,ACQUEDOTTO} = 9 \cdot 50{,}41 + 9 \cdot 36{,}71 = 784{,}08€ . \quad (6.44)$$

Per ottenere il costo complessivo associato ai consumi è poi necessario prendere anche in considerazione le componenti riferite rispettivamente allo scarico nella rete fognaria e al sistema di depurazione delle acque reflue: a differenza della precedente quota, in questo caso gli importi sono privi di un tariffario idrico a scaglioni e valgono rispettivamente:

$$C_{APPARTAMENTO\ GRANDE,FOGNATURA} = 99{,}325 \cdot 0{,}213161 = 21{,}17€ ; \quad (6.45)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ PICCOLO,FOGNATURA} = 78{,}360 \cdot 0{,}213161 = 16{,}70€ ; \quad (6.46)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ GRANDE,DEPURAZIONE} = 99{,}325 \cdot 0{,}461843 = 45{,}87€ ; \quad (6.47)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ PICCOLO,DEPURAZIONE} = 78{,}360 \cdot 0{,}461843 = 36{,}19€ . \quad (6.48)$$

I costi variabili totali associati alle immissioni nella rete fognaria e alla depurazione valgono pertanto:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,FOGNATURA} = 9 \cdot 21{,}17 + 9 \cdot 16{,}70 = 340{,}83€ ; \quad (6.49)$$

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,DEPURAZIONE} = 9 \cdot 45{,}87 + 9 \cdot 36{,}19 = 738{,}54€ . \quad (6.50)$$

In conclusione, il costo variabile complessivo associato all'intero condominio viene calcolato come somma delle tre componenti che fanno riferimento ai consumi idrici prelevati dalla sola rete acquedottistica, alle immissioni nella rete fognaria e ai volumi trattati dal sistema di depurazione, come indicato nella relazione seguente:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE} = 784{,}08 + 340{,}83 + 738{,}54 = 1.863{,}45€ . \quad (6.51)$$

Il costo totale è infine espresso dalla somma della quota fissa e di quella variabile:

$$C_{TOTALE} = C_{FISSO\ TOTALE} + C_{VARIABILE\ \ TOTALE} = 478{,}17 + 1.863{,}45 = 2.341{,}62€ . \quad (6.52)$$

Considerando inoltre l'I.V.A. pari a 10% dell'imponibile, il costo totale per l'anno 2019 è pari a:

$$C_{TOTALE+I.V.A.} = 1{,}10 \cdot 2.341{,}62 = 2.575{,}78€ . \quad (6.53)$$

Occorre infine considerare i costi iniziali per l'acquisto del serbatoio, pari a 17.200,00 €; le ulteriori spese sono associate alla pompa per il sollevamento dell'acqua piovana, al kit di pressurizzazione, al pozzetto con filtro autopulente e all'installazione dell'intero sistema e sono riportate sul sito internet della Rototec S.p.A.

Complessivamente, il costo iniziale è pari a:

$$C_{INIZIALE} = C_{SERBATOIO} + C_{POMPA} + C_{PRESSURIZZAZIONE} + C_{POZZETTO+FILTRO} + C_{INSTALLAZIONE} =$$

$$= 17.200{,}00 + 479{,}00 + 630{,}00 + 585{,}00 + 5.000{,}00 = 23.894{,}00€ . \quad (6.54)$$

Il costo complessivo previsto per il 2019, anno di installazione del sistema RWH, è pertanto espresso dalla somma dei costi di installazione del sistema stesso $(23.894{,}00\ €)$ e di quelli fissi e variabili da corrispondere al gestore del Servizio Idrico Integrato $(2.575{,}78\ €)$:

$$C_{2019} = C_{INIZIALE} + C_{TOTALE+I.V.A.} = 23.894{,}00 + 2.575{,}78 = 26.469{,}78€ . \quad (6.55)$$

Occorre specificare che la precedente analisi economica non ha considerato i costi energetici da sostenere annualmente per il pompaggio dell'acqua dal serbatoio di stoccaggio alle apparecchiature idriche; essi costituiscono infatti un'aliquota secondaria se confrontata direttamente con i costi per l'installazione del sistema RWH e con quelli relativi alla fornitura idrica dalla rete acquedottistica. In ogni caso, viene riportata di seguito un'espressione esemplificativa per la loro determinazione:

$$C_{POMPAGGIO} = Costo\ unitario\left[\frac{€}{KWh}\right] \cdot n°ore\ di\ utilizzo\left[\frac{h}{d}\right] \cdot Potenza\ \ pompa[KW] \cdot 365[d], \quad (6.56)$$

dove il numero di ore giornaliere di utilizzo della pompa è a sua volta ottenuto dividendo il volume di acqua prelevato quotidianamente dal serbatoio per la portata nominale dalla pompa, sulla base dell'equazione sotto riportata:

$$n°ore\ di\ utilizzo[h] = \frac{V[m^3]}{Q_n\left[\frac{m^3}{h}\right]} . \quad (6.57)$$

Note le diverse grandezze, è possibile inserirle nelle due formulazioni precedenti in modo da determinare il costo annuo per il pompaggio dell'acqua:

$$n°ore\ di\ utilizzo[h] = \frac{4{,}381[m^3]}{3{,}6\left[\frac{m^3}{h}\right]} = 1{,}22h ; \quad (6.58)$$

$$C_{POMPAGGIO} = 0{,}09\left[\frac{€}{KWh}\right] \cdot 1{,}22\left[\frac{h}{d}\right] \cdot 0{,}6[KW] \cdot 365[d] = 24{,}05€ . \quad (6.59)$$

Il precedente valore costituisce una frazione minima rispetto alla spesa per la fornitura idrica dalla rete municipalizzata ed è pertanto trascurabile, in quanto influisce sul costo totale annuo per una percentuale pari a:

$$\frac{Costo_{POMPAGGIO}}{Costo_{TOTALE+I.V.A.}} = \frac{24{,}05}{2\,575{,}78 + 24{,}05} \cdot 100 = \frac{24{,}05}{2\,599{,}83} \cdot 100 = 0{,}925\% . \qquad (6.60)$$

Ipotizzando che i consumi idrici dell'edificio e il suo numero di residenti siano costanti per tutta la durata dell'analisi, il costo totale annuo da corrispondere al gestore del Servizio Idrico Integrato è calcolato anche per l'intervallo temporale 2010-2018, ottenendo i seguenti risultati:

Anno	Costo [€]	Anno	Costo [€]
2010	1˙878,48	2015	2˙298,43
2011	1˙681,32	2016	2˙453,12
2012	1˙681,32	2017	2˙362,73
2013	2˙151,27	2018	2˙575,78
2014	2˙151,27	2019	2˙575,78

Tabella 6.11: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% per il decennio 2010-2019.

I precedenti risultati sono diagrammati nel grafico sottostante, in cui viene riportata anche la retta interpolante, di equazione:

$$y = 103{,}01 \cdot x + 1\,614{,}40 , \qquad (6.61)$$

dove la variabile indipendente x indica l'anno di riferimento, mentre la variabile dipendente y esprime invece il costo totale annuo relativo all'intero edificio in esame. In particolare, il coefficiente angolare esprime il concetto che l'incremento medio del costo annuo è di poco superiore a 103 €.

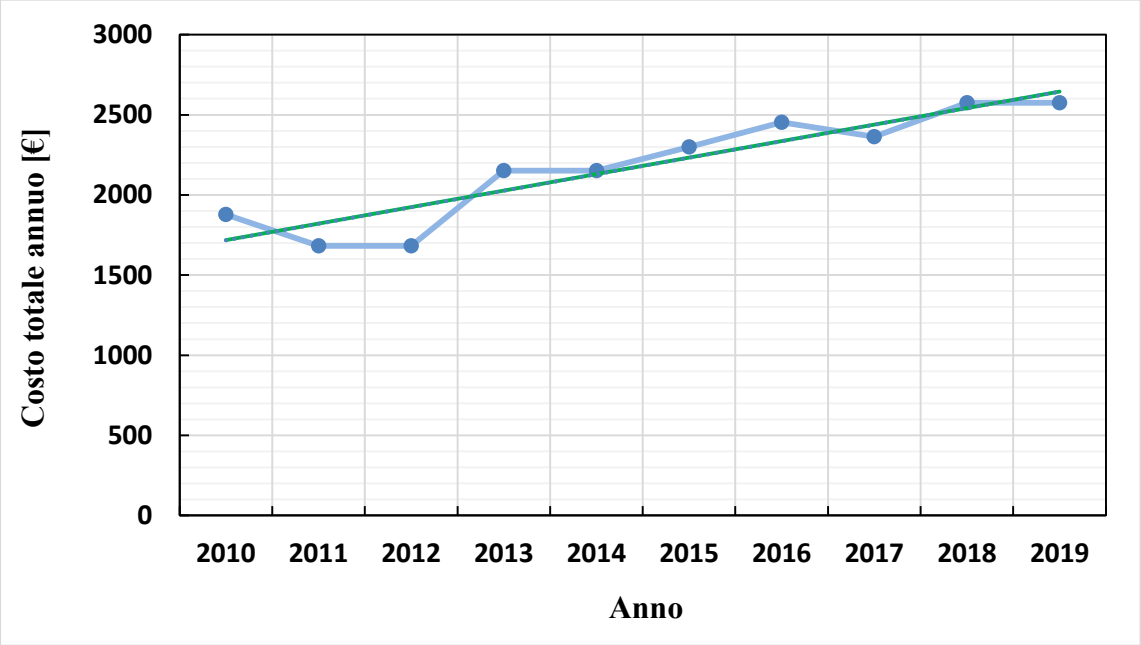

Figura 6.11: Costi totali annui per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica.

L'equazione della retta interpolante è necessaria per determinare i costi totali annui per tutto l'intervallo temporale di riferimento, ossia il trentennio 2019-2048: sfruttando infatti la precedente equazione, è possibile estrapolare i singoli costi annui e di conseguenza ricavare il costo totale, da confrontare con quello precedentemente ottenuto relativamente ad un impianto idrico tradizionale.

Nella tabella seguente sono riportati i singoli costi annui:

Anno	Costo [€]	Anno	Costo [€]
2019	2˙575,78	2034	4˙189,74
2020	2˙747,60	2035	4˙292,75
2021	2˙850,61	2036	4˙395,76
2022	2˙953,62	2037	4˙498,77
2023	3˙056,63	2038	4˙601,78
2024	3˙159,64	2039	4˙704,79
2025	3˙262,65	2040	4˙807,80
2026	3˙365,66	2041	4˙910,81
2027	3˙468,67	2042	5˙013,82
2028	3˙571,68	2043	5˙116,83
2029	3˙674,69	2044	5˙219,84
2030	3˙777,70	2045	5˙322,85
2031	3˙880,71	2046	5˙425,86
2032	3˙983,72	2047	5˙528,87
2033	4˙086,73	2048	5˙631,88

Tabella 6.12: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% previsti per il trentennio 2019-2048.

I costi annui, visualizzabili nel diagramma seguente, possono essere sommati tra loro in modo da determinare il costo totale da corrispondere al gestore del Servizio Idrico Integrato nel trentennio 2019-2048, espresso dalla relazione sottostante:

$$C_{TOTALE,SERVIZIO\ \ IDRICO} = \sum_{i=1}^{30} C_i = 124˙078{,}24€ . \qquad (6.62)$$

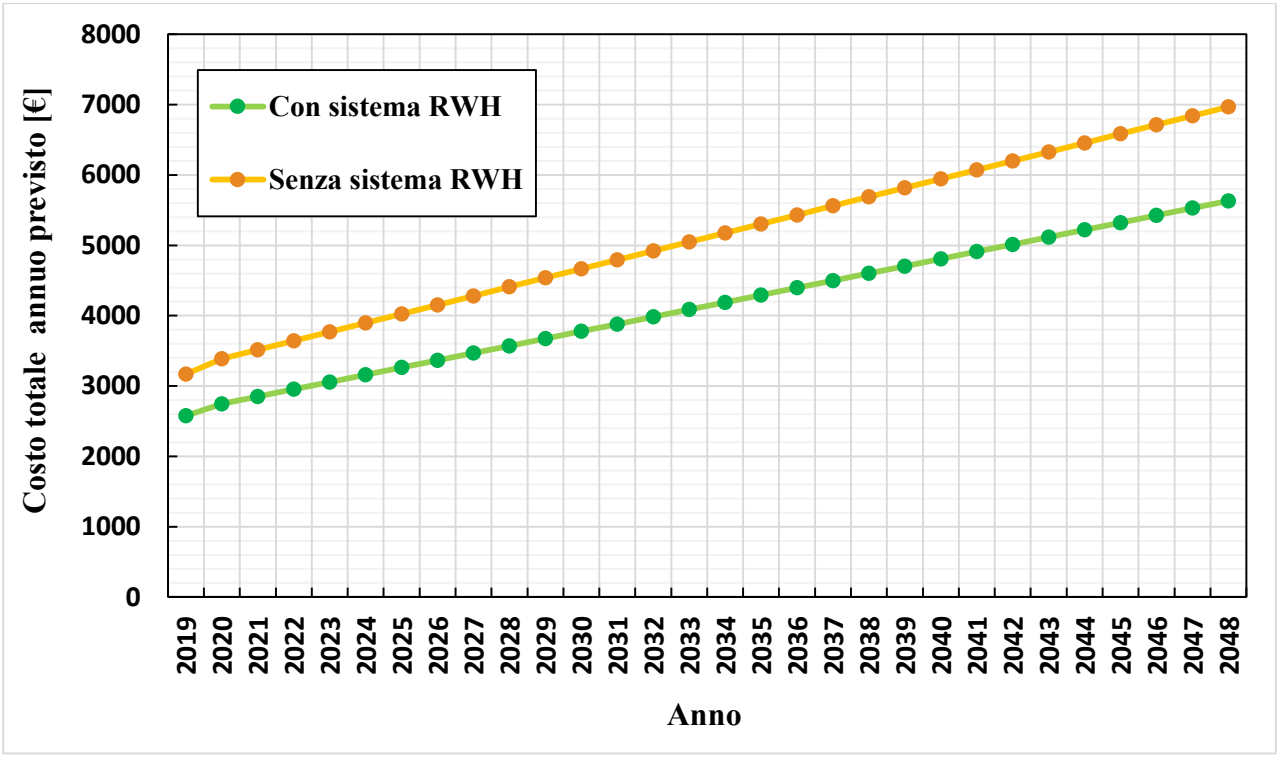

Figura 6.12: Costi totali annui previsti per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica con o senza l'installazione del sistema RWH.

Occorre inoltre calcolare l'importo complessivo che i residenti del condominio devono sostenere durante i 30 anni di vita utile del sistema RWH; tale valore si ottiene sommando ai costi per il Servizio Idrico Integrato quelli iniziali per l'installazione del sistema di raccolta delle acque piovane, come calcolato nell'equazione di seguito riportata:

$$C_{COMPLESSIVO} = C_{TOTALE,SERVIZIO\ IDRICO} + C_{INIZIALE} = 124{\cdot}078{,}24 + 23{\cdot}894{,}00 = 147{\cdot}972{,}24€ . \quad (6.63)$$

Infine, il beneficio finanziario (B) garantito dalla realizzazione del sistema RainWater Harvesting è espresso dalla differenza tra i costi che gli utenti del condominio in esame devono sostenere rispettivamente in assenza e in presenza del sistema di raccolta, come indicato nella seguente formulazione:

$$B = C_{PRE\ RWH} - C_{POST\ RWH} = 153{\cdot}305{,}65 - 147{\cdot}972{,}24 = 5{\cdot}333{,}41€ . \quad (6.64)$$

Il risultato ottenuto esprime il concetto che il risparmio garantito dal sistema RWH è superiore rispetto al costo iniziale necessario per l'installazione del sistema stesso: la raccolta e il successivo riutilizzo delle acque meteoriche risulta pertanto conveniente dal punto di vista economico e tale vantaggio si somma a quello ecologico-ambientale relativo al risparmio idrico. Il contributo principale che determina il sopracitato beneficio finanziario (B) è rappresentato dal notevole incremento che il

prezzo dell'acqua sta subendo nel corso degli anni: i sistemi RWH intervengono proprio per far fronte a questo problema, in quanto garantiscono una diminuzione del volume di acqua prelevato dalla rete pubblica, garantendo conseguentemente un beneficio, oltre che ambientale, anche economico.

Dopo aver esaminato le due opzioni di approvvigionamento idrico, è possibile eseguire il confronto diretto in termini di costi cumulati, che sono diagrammati nella figura sottostante:

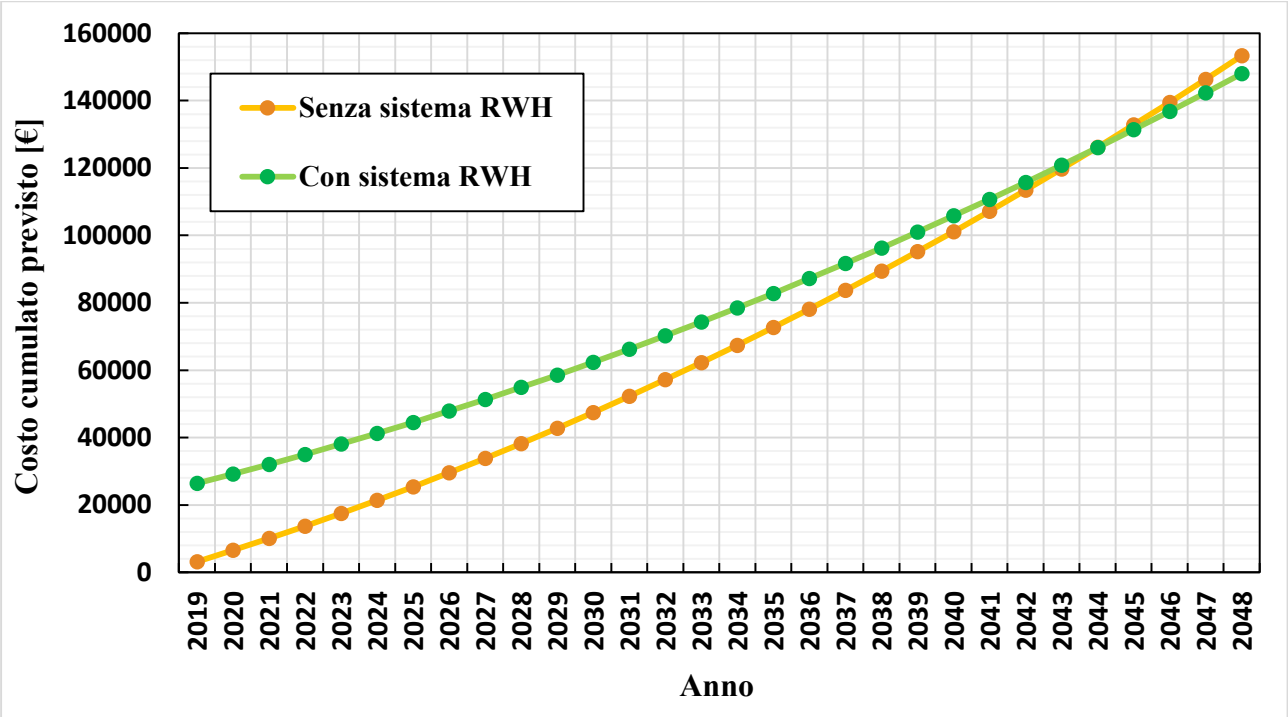

Figura 6.13: Costi cumulati previsti in caso di assenza o installazione del sistema RWH.

Come è possibile osservare dal grafico, l'installazione del sistema RainWater Harvesting risulta economicamente conveniente nel periodo trentennale 2019-2048 preso come riferimento per la valutazione; in particolare, l'anno in cui si consegue per la prima volta il risparmio economico per garantire l'approvvigionamento idrico dell'edificio è il 2044, ossia il ventiseiesimo anno di utilizzo del sistema RWH.

6.2 Secondo caso studio: Villa bifamiliare

L'obiettivo è quello di eseguire un'analisi costi-benefici per un edificio residenziale totalmente diverso da quello analizzato precedentemente: l'edificio in questione, ubicato anch'esso nel territorio del comune di Mondovì, è infatti una villa bifamiliare. La scelta di analizzare una struttura totalmente diversa è da ricercare nella volontà di valutare la versatilità dell'analisi economica su uno spettro di casistiche più ampio, incrementando le conoscenze su questo aspetto: i parametri di input presentano infatti notevoli differenze rispetto a quelli introdotti in precedenza, pertanto la stessa soluzione può risultare economicamente favorevole oppure sfavorevole in funzione delle variabili considerate.

6.2.1 Caratteristiche dell'edificio oggetto di studio

La tabella sottostante riassume le principali caratteristiche dell'edificio in questione:

Ubicazione	Mondovì (CN)
Numero di piani	2 + piano interrato
Area della copertura	118 m^2
Superficie di ogni piano	108 m^2
Superficie calpestabile di ogni piano	94 m^2
Numero di unità abitative	2
Numero di residenti	5
Gestore del servizio idrico integrato	Mondo Acqua S.p.A

Tabella 6.13: Caratteristiche dell'edificio preso in esame.

Figura 6.14: Vista esterna dell'edificio.

Il fabbricato presenta due piani abitativi ed un piano interrato ed è costituito complessivamente da due unità abitative; di seguito viene riportata la planimetria di un generico piano dell'edificio, tale per cui ogni appartamento si compone di quattro camere, un angolo cottura e un bagno.

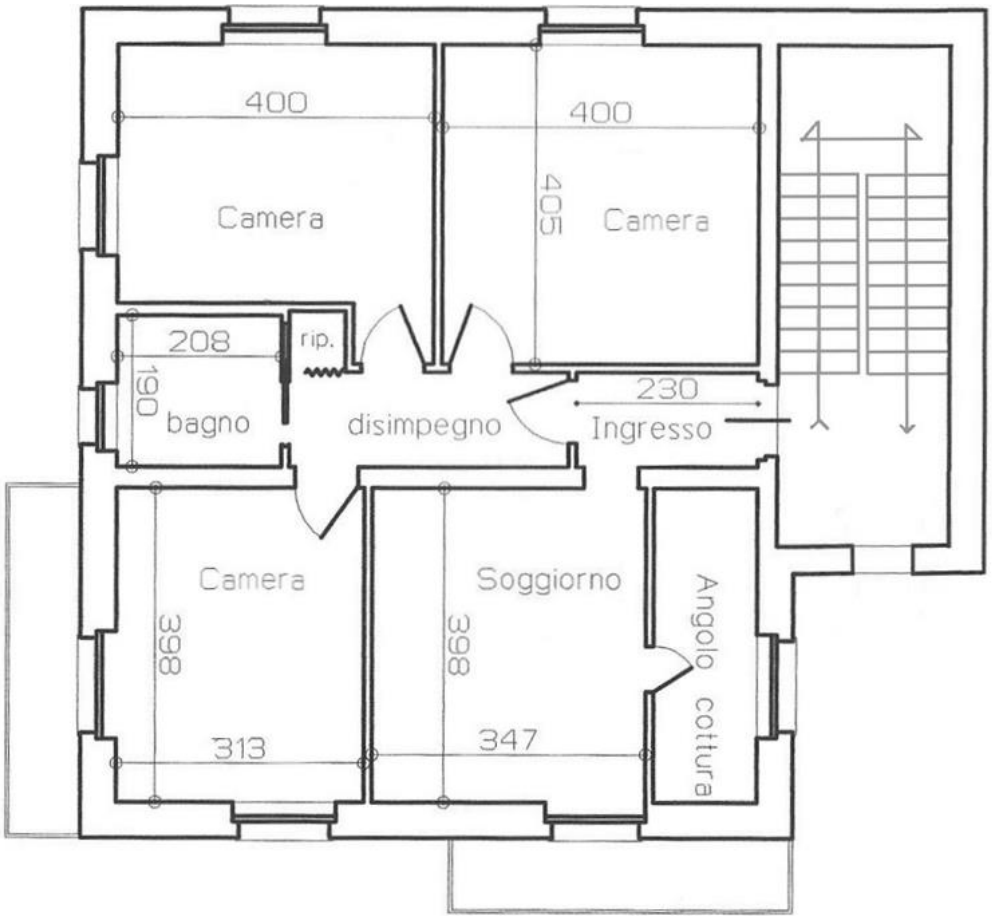

Figura 6.15: Planimetria di un generico piano della villa bifamiliare.

6.2.2 Rilevamento dei consumi

La fornitura idrica dell'edificio avviene esclusivamente tramite la rete acquedottistica municipale, pertanto l'edificio è sprovvisto sia un sistema RWH per la raccolta dell'acqua piovana che di un sistema per il riutilizzo delle acque grigie.

Il monitoraggio dei consumi ha avuto una durata complessiva di 28 giorni, in modo da ridurre l'incertezza dei risultati. Le domande idriche giornaliere sono poi state ripartite, per ogni settimana di cui si compone il periodo di monitoraggio, tra i cinque giorni lavorativi e i due giorni festivi, sia per determinare il reale costo in bolletta associato ai consumi idrici che per eseguire successivamente il corretto dimensionamento del serbatoio per la raccolta delle acque piovane. Lo strumento impiegato per eseguire il rilevamento dei consumi è, così come per l'edificio precedentemente considerato, un contatore a lettura diretta.

La tabella seguente riporta le principali informazioni relative al monitoraggio dei consumi:

Data di inizio delle rilevazioni	18 novembre 2019
Data di fine delle rilevazioni	15 dicembre 2019
Orario di ogni rilevazione	00:00
Tipologia del contatore	Contatore a lettura diretta
Portata nominale	$Q_n = 1{,}5\ m^3 \cdot h^{-1}$
Sensibilità del contatore	0,0001 m^3

Tabella 6.14: Dati relativi al monitoraggio dei consumi.

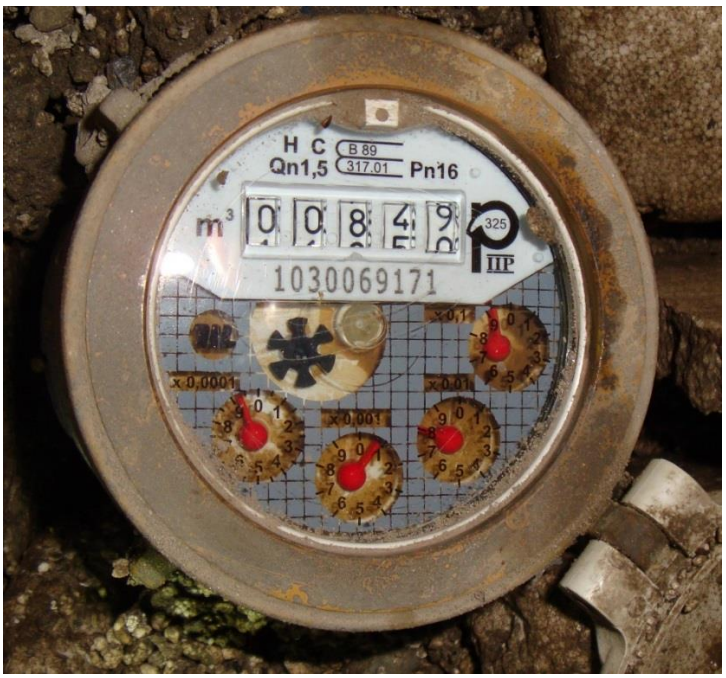

Figura 6.16: Contatore dell'acqua installato in prossimità dell'ingresso dell'edificio.

6.2.3 Elaborazione dei dati

I valori dei consumi idrici giornalieri, monitorati tra il 18 novembre e il 15 dicembre 2019 e riportati nella tabella seguente, sono stati ripartiti tra giorni lavorativi e festivi per sottolineare la differenza di domanda idrica che intercorre tra queste due classi, incrementando di conseguenza la precisione dell'analisi. Per ognuna delle due precedenti categorie sono stati poi tracciati gli andamenti temporali dei consumi e la relativa retta interpolante, il cui coefficiente angolare esprime numericamente il consumo idrico giornaliero medio: dividendo infine i due valori ottenuti per il numero di utenti, si è ottenuto il consumo idrico giornaliero pro capite.
La tabella seguente riporta i consumi giornalieri pro capite ottenuti dal monitoraggio:

Data	Consumi		Data	Consumi	
	Totali $[m^3]$	Pro capite $\left[\frac{l}{g \cdot ab}\right]$		Totali $[m^3]$	Pro capite $\left[\frac{l}{g \cdot ab}\right]$
18 novembre	0,6692	133,84	2 dicembre	0,6499	129,98
19 novembre	0,7059	141,18	3 dicembre	0,6909	138,17
20 novembre	0,6489	129,78	4 dicembre	0,6668	133,35
21 novembre	0,6628	132,56	5 dicembre	0,6584	131,68
22 novembre	0,6384	127,67	6 dicembre	0,6863	137,26
23 novembre	0,7816	156,32	**7 dicembre**	0,7690	153,79
24 novembre	0,8281	165,62	**8 dicembre**	0,8072	161,44
25 novembre	0,7168	143,35	9 dicembre	0,6449	128,97
26 novembre	0,6988	139,76	10 dicembre	0,7045	140,90
27 novembre	0,6446	128,92	11 dicembre	0,6548	130,96
28 novembre	0,6623	132,45	12 dicembre	0,6341	126,81
29 novembre	0,7002	140,04	13 dicembre	0,6627	132,54
30 novembre	0,7933	158,65	**14 dicembre**	0,7813	156,26
1 dicembre	0,7998	159,96	**15 dicembre**	0,8191	163,81

Tabella 6.15: Consumi idrici giornalieri della villa bifamiliare.

Nei due grafici sottostanti sono diagrammati i consumi pro capite cumulati nei giorni lavorativi e in quelli festivi, con le relative rette interpolanti: essendo il numero dei residenti minore rispetto al caso precedente, la variazione della domanda idrica giornaliera è più sensibile, pertanto i singoli punti, pur giacendo in prossimità della retta, deviano maggiormente da essa.

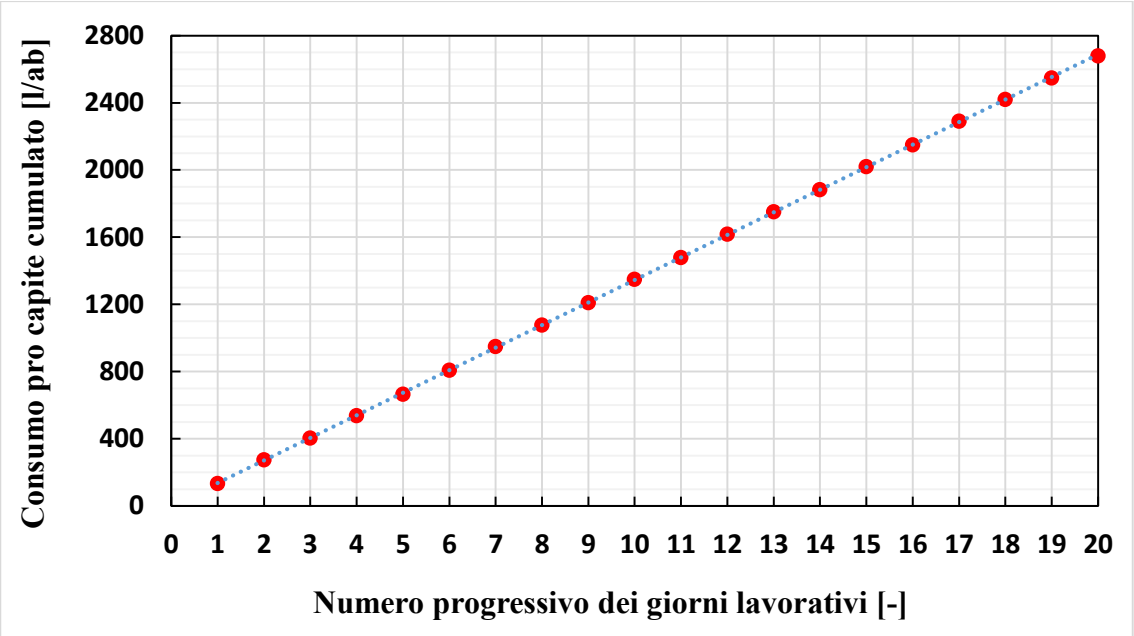

Figura 6.17: Consumi pro capite progressivi nei giorni lavorativi e retta interpolante.

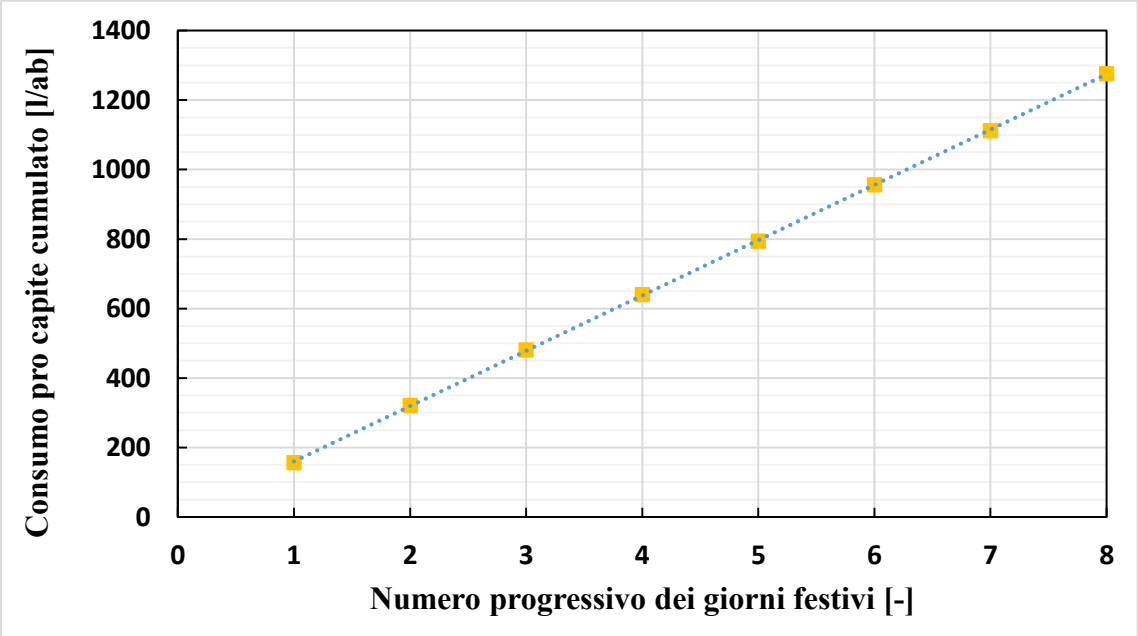

Figura 6.18: Consumi pro capite progressivi nei giorni festivi e retta interpolante.

Complessivamente, la campagna di monitoraggio dei consumi ha fornito i seguenti valori:

- il consumo medio pro capite di un giorno lavorativo è pari a 134,01 litri;
- il consumo medio pro capite di un giorno festivo è invece pari a 159,48 litri.

L'incremento dei consumi in un giorno festivo è di 25,47 litri, ossia circa il 19,01% in più rispetto al valore registrato in un giorno lavorativo: questa differenza è stata presa in considerazione in quanto non è trascurabile ed è dovuta al fatto che 80% dell'utenza, ossia quattro dei cinque residenti, è

composto da lavoratori e studenti, che determinano una fluttuazione della domanda idrica superiore rispetto al caso precedente. In conclusione, questo risultato indica non solo che la tipologia di utenza condiziona l'andamento dei consumi idrici dell'edificio, ma anche che al diminuire del numero di residenti la variabilità della richiesta d'acqua si fa sempre più marcata.

Il seguente diagramma ha infine l'obiettivo di raffigurare l'andamento generale della domanda idrica pro capite per tutti i 28 giorni del monitoraggio:

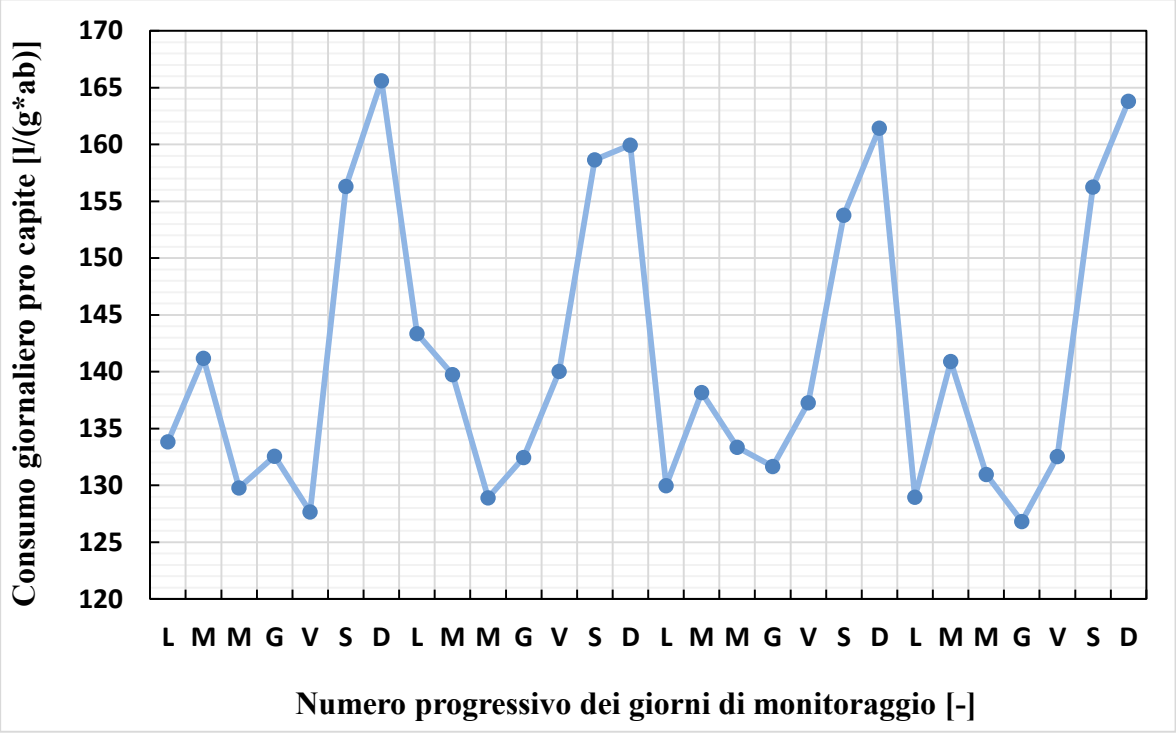

Figura 6.19: Consumi giornalieri pro capite per l'intervallo temporale considerato.

6.2.4 Valutazione economica di un impianto idrico tradizionale

Per determinare la spesa totale annua per l'approvvigionamento idrico garantito esclusivamente dall'utilizzo della rete acquedottistica municipale, è necessario analizzare le varie voci di costo riportate in allegato alla fattura per il servizio idrico integrato della villa. Le spese annuali per il suddetto servizio vengono ripartite in due quote: la prima presenta un valore fisso, relativo al solo accesso al servizio, mentre la seconda è associata ai consumi idrici effettivi e prevede una suddivisione in quattro fasce tariffarie relativamente all'acquedotto, mentre per quanto riguarda la fognatura e il servizio di depurazione è invece prevista un'unica quota di spesa.
Poiché l'edificio in questione è situato sul territorio dello stesso comune considerato per il caso studio precedente, la struttura tariffaria stabilita dal gestore del Servizio Idrico Integrato, riportata in tabella 6.4, è di conseguenza la stessa.

Si è ora in possesso di tutti i dati necessari per valutare il costo complessivo per l'approvvigionamento idrico dalla rete acquedottistica, facendo riferimento ad un intervallo di tempo trentennale. Il costo fisso è ottenuto, per ogni unità abitativa, dalla somma delle tre quote fisse relative rispettivamente all'acquedotto, alla fognatura e alla depurazione, come riportato nella formula sottostante:

$$C_{FISSO} = C_{acquedotto} + C_{fognatura} + C_{depurazione}; \tag{6.65}$$

per ogni appartamento, la quota fissa di accesso al servizio vale pertanto:

$$C_{FISSO} = C_{acquedotto} + C_{fognatura} + C_{depurazione} = 15{,}15 + 4{,}57 + 9{,}98 = 29{,}70 \frac{€}{anno}. \tag{6.66}$$

Complessivamente, la quota fissa per l'accesso al Servizio Idrico Integrato dell'intero edificio è data dalla somma dei costi fissi delle due unità abitative, come espresso dalla relazione seguente:

$$C_{FISSO,EDIFICIO} = 2 \cdot C_{FISSO} = 2 \cdot 29{,}70 = 59{,}40 \frac{€}{anno}. \tag{6.67}$$

Per determinare invece il costo in bolletta associato ai consumi, considerando sempre un intervallo temporale di 30 anni, è necessario definire innanzitutto il volume annuo della domanda idrica: essa è stata valutata a partire dai consumi pro capite, ottenuti come risultato del monitoraggio. Quest'ultimo aveva fornito un valore pari a 134,01 litri per i giorni lavorativi e 159,48 litri per quelli festivi, il cui numero medio in un anno ammonta rispettivamente a 253 e 112. A partire dal consumo idrico annuo totale, relativo ai 37 residenti dell'edificio, è possibile determinare i rispettivi valori per le due unità abitative; si adotta in questo caso un criterio di ripartizione dei volumi in funzione del numero di residenti, in quanto i due appartamenti presentano la stessa estensione e un differente numero di occupanti: un appartamento è infatti occupato da una sola persona, mentre l'altro appartamento è abitato da quattro persone.

Le tre espressione seguenti riportano la procedura applicata:

$$V = 5 \cdot (253 \cdot 134{,}01 + 112 \cdot 159{,}48) = 258{,}835 m^3; \tag{6.68}$$

$$V_{APPARTAMENTO\ 1} = \frac{1}{5} \cdot 258{,}835 = 51{,}767 m^3; \tag{6.69}$$

$$V_{APPARTAMENTO\ 2} = \frac{4}{5} \cdot 258{,}835 = 207{,}068 m^3. \tag{6.70}$$

Noti i volumi idrici annui prelevati da entrambi gli appartamenti, vengono ricavati i relativi costi annui: con riferimento al tariffario idrico riportato in tabella 3.4, si rileva che il primo appartamento rientra, per i soli prelievi dalla rete acquedottistica, nella fascia tariffaria agevolata (fascia 1), essendo i consumi annui inferiori a 60 m^3 annui, mentre il secondo appartamento rientra nella fascia tariffaria di primo supero (fascia 3), in quanto i consumi annui sono compresi tra 181 m^3 e 220 m^3.

Le due formule seguenti riportano i costi annui per le due unità abitative; questi importi sono per loro natura variabili, in quanto si basano sui volumi annui prelevati, e vengono calcolati per mezzo di una sommatoria a scaglioni, fondata sulle diverse fasce tariffarie:

$$C_{APPARTAMENTO\ 1,ACQUEDOTTO} = 51{,}767 \cdot 0{,}411794 = 21{,}32€\,; \tag{6.71}$$

$$C_{APPARTAMENTO\ 2,ACQUEDOTTO} = 60 \cdot 0{,}411794 + 120 \cdot 0{,}653641 + 27{,}068 \cdot 1{,}960925 = 156{,}23€\,. \tag{6.72}$$

Complessivamente, il costo annuo associato al solo prelievo dalla rete acquedottistica vale:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,ACQUEDOTTO} = 21{,}32 + 156{,}23 = 177{,}55€\,. \tag{6.73}$$

Occorre poi prendere in considerazione le componenti riferite rispettivamente allo scarico nella rete fognaria e al sistema di depurazione delle acque reflue; a differenza della precedente quota, in questo caso le tariffe sono prive di un tariffario idrico a scaglioni e valgono rispettivamente:

$$C_{APPARTAMENTO\ 1,FOGNATURA} = 51{,}767 \cdot 0{,}213161 = 11{,}03€\,; \tag{6.74}$$

$$C_{APPARTAMENTO\ 2,FOGNATURA} = 207{,}068 \cdot 0{,}213161 = 44{,}14€\,; \tag{6.75}$$

$$C_{APPARTAMENTO\ 1,DEPURAZIONE} = 51{,}767 \cdot 0{,}461843 = 23{,}91€\,; \tag{6.76}$$

$$C_{APPARTAMENTO\ 2,DEPURAZIONE} = 207{,}068 \cdot 0{,}461843 = 95{,}63€\,. \tag{6.77}$$

I costi variabili totali associati alle immissioni nella rete fognaria e alla depurazione delle acque reflue valgono pertanto:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,FOGNATURA} = 11{,}03 + 23{,}91 = 34{,}94€\,; \tag{6.78}$$

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,DEPURAZIONE} = 44{,}14 + 95{,}63 = 139{,}77€\,. \tag{6.79}$$

In conclusione, il costo variabile complessivo associato all'intero edificio viene calcolato come somma delle tre componenti che fanno riferimento ai consumi idrici prelevati dalla rete acquedottistica, alle immissioni nella rete fognaria e ai volumi trattati dal sistema di depurazione, come indicato nella relazione seguente:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE} = 177{,}55 + 34{,}94 + 139{,}77 = 352{,}26€\,. \tag{6.80}$$

Il costo totale è infine espresso dalla somma della quota fissa e di quella variabile:

$$C_{TOTALE} = C_{FISSO\ TOTALE} + C_{VARIABILE\ \ TOTALE} = 59{,}40 + 352{,}26 = 411{,}66€\,. \tag{6.81}$$

Considerando inoltre l'I.V.A. pari a 10% dell'imponibile, emerge che il costo complessivo relativamente all'anno 2019 è pari a:

$$C_{TOTALE+I.V.A.} = 1{,}10 \cdot 411{,}66 = 452{,}83€\,. \tag{6.82}$$

Per effettuare una valutazione della possibile convenienza economica del sistema RWH, è necessario confrontare il costo complessivo associato all'impianto idrico tradizionale con quello relativo alla contemporanea presenza della rete acquedottistica e di un sistema per la raccolta delle acque piovane: questo confronto viene esteso alla vita utile del serbatoio, supposta pari a 30 anni. Ipotizzando che i consumi idrici dell'edificio e il suo numero di residenti siano costanti per tutta la durata dell'analisi, si ripete la procedura precedentemente descritta per la valutazione del costo annuo complessivo anche per i nove anni precedenti, ottenendo i seguenti risultati:

Anno	Costo [€]	Anno	Costo [€]
2010	317,54	2015	411,36
2011	295,80	2016	433,92
2012	295,80	2017	418,56
2013	383,74	2018	452,83
2014	383,74	2019	452,83

Tabella 6.16: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% per il decennio 2010-2019.

Così come si è precedentemente osservato per il condominio, anche per la villa si assiste ad un notevole incremento dei costi totali nel periodo 2010-2019: questo è dovuto sia alla crescita dei costi fissi $[€/anno]$, relativi all'approvvigionamento idrico, che di quelli variabili, associati invece ai consumi $[€/(m^3 \cdot anno)]$.

I precedenti risultati possono essere diagrammati nel grafico sottostante:

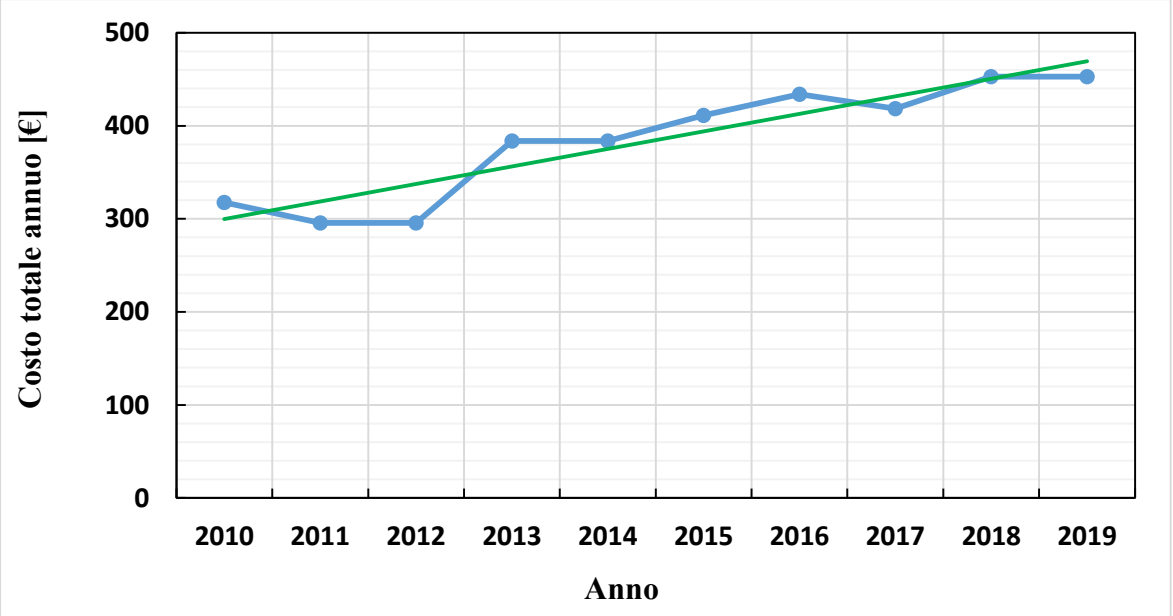

Figura 6.20: Costi totali annui per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica.

La retta interpolante tracciata sul precedente grafico ha equazione:

$$y = 18{,}841 \cdot x + 280{,}99\,, \tag{6.83}$$

dove la variabile indipendente x indica l'anno di riferimento, mentre la variabile dipendente y esprime invece il costo totale annuo relativo all'intero edificio in esame. In particolare, il coefficiente angolare della retta esprime il concetto che l'incremento medio del costo annuo per l'intera utenza è di poco inferiore a 19 €.

L'equazione della retta interpolante è necessaria a determinare i costi totali annui per l'intero intervallo temporale di riferimento, ossia il trentennio 2019-2048, usato come riferimento: essa consente infatti di determinare i singoli costi annui e quindi il costo totale, che sarà poi confrontato con quello relativo ad un sistema idrico a doppio impianto, il quale prevede l'approvvigionamento idrico sia dalla rete acquedottistica che da un sistema per la captazione delle acque meteoriche.

Nella tabella seguente sono riportati i singoli costi annui:

Anno	Costo [€]	Anno	Costo [€]
2019	452,83	2034	752,02
2020	488,24	2035	770,86
2021	507,08	2036	789,70
2022	525,92	2037	808,54
2023	544,76	2038	827,38
2024	563,61	2039	846,22
2025	582,44	2040	865,06
2026	601,29	2041	883,90
2027	620,13	2042	902,74
2028	638,97	2043	921,58
2029	657,81	2044	940,43
2030	676,65	2045	959,27
2031	695,49	2046	978,11
2032	714,33	2047	996,95
2033	733,17	2048	1˙015,79

Tabella 6.17: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% previsti per il trentennio 2019-2048.

I costi annui possono essere visualizzati nel diagramma sottostante:

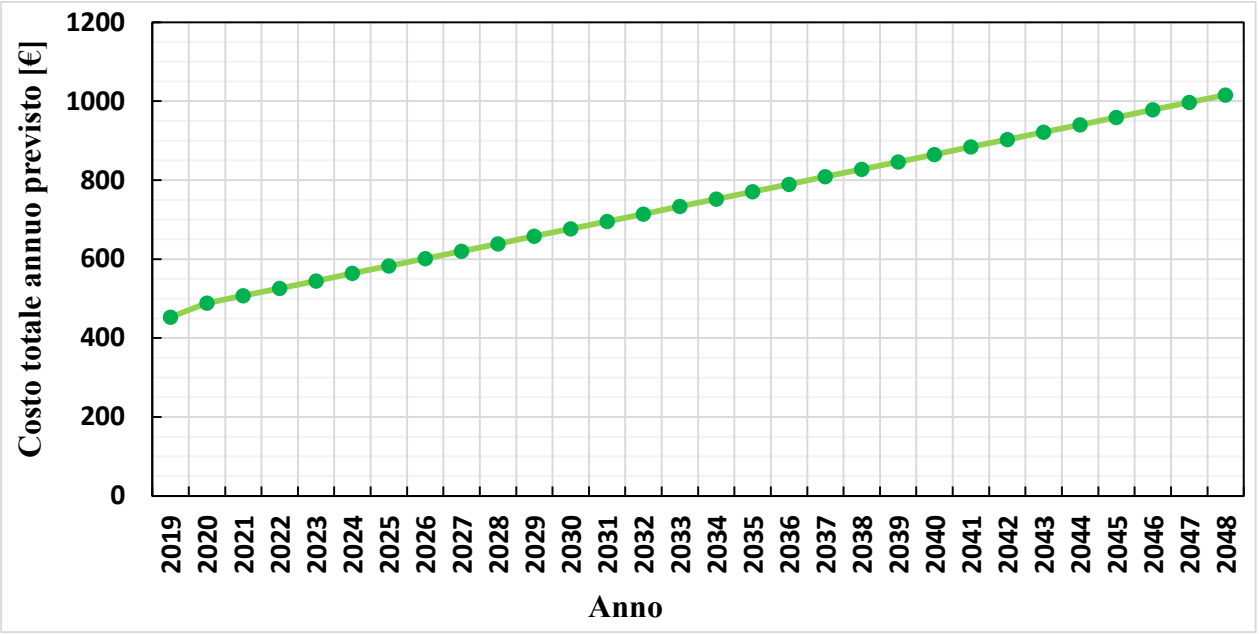

Figura 6.21: Costi totali annui previsti per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica.

Il costo totale da corrispondere al gestore del Servizio Idrico Integrato, ottenuto dalla sommatoria dei singoli costi annui, è quindi pari a:

$$C_{TOTALE} = \sum_{i=1}^{30} C_i = 22.261{,}27€ . \qquad (6.84)$$

6.2.5 Progettazione di un serbatoio per la raccolta delle acque piovane

Per ridurre i prelievi idrici dalla rete acquedottistica municipale è possibile realizzare strategie alternative: le possibili soluzioni sono costituite dalla raccolta delle acque piovane, dal riciclaggio delle acque grigie o da una combinazione delle due precedenti metodologie. Di seguito verrà valutata l'installazione di un sistema RainWater Harvesting per la captazione e il successivo stoccaggio delle acque meteoriche e saranno confrontati i risultati con quelli precedentemente ottenuti per il condominio.

La cisterna di raccolta delle acque meteoriche è stata dimensionata seguendo le direttive previste dalla normativa UNI/TS 11445:2012: così come effettuato per il sistema RWH del condominio, anche in questo caso si è scelto di applicare il metodo semplificato, poiché quello analitico richiede la conoscenza di dati pluviometrici e di domanda idrica su scala temporale giornaliera, oraria o sub-oraria, non disponibili per il sito in esame.

Per effettuare la corretta valutazione dell'altezza media annua di pioggia si prendono in considerazione i valori riportati sul sito internet dell'Arpa Piemonte, la quale ha monitorato nell'intervallo temporale compreso tra il 1951 e 1990, con riferimento alla città di Mondovì, un'altezza media annua di precipitazione pari a 889 mm. I valori ottenuti, seppur non recenti, sono estremamente significativi poiché si riferiscono ad un intervallo temporale superiore al valore minimo di 30 anni richiesto dalla specifica tecnica di riferimento.
Il volume meteorico annuo (Q) potenzialmente stoccabile nel serbatoio di raccolta dell'edificio viene calcolato con la seguente equazione:

$$Q = \varphi \cdot P \cdot A\,, \tag{6.85}$$

con:

- $\varphi = 0{,}8$: coefficiente di afflusso della copertura, determinato sulla base delle indicazioni fornite dalla specifica tecnica UNI/TS 11445:2012 con la tabella 6.7;
- $P = 889mm$: altezza di pioggia media annua, ottenuta dalle rilevazioni eseguite dalla stazione pluviometrica più vicina e disponibili sul sito internet dell'Arpa Piemonte (si fa riferimento ai dati riportati in tabella 6.8); il precedente valore fa riferimento alle precipitazioni totali ed esclude quindi di deviare dal serbatoio le acque di prima pioggia;
- $A = 118m^2$: area della proiezione orizzontale della superficie di copertura.

Inserendo questi valori nella precedente relazione, si ricava il volume potenziale di acqua piovana captabile dal tetto dell'edificio:

$$Q = \varphi \cdot P \cdot A = 0{,}8[-] \cdot 889[mm] \cdot 118[m^2] = 83{,}922m^3\,. \tag{6.86}$$

La domanda idrica per utilizzi diversi dal consumo umano viene anch'essa determinata sfruttando la normativa italiana UNI/TS 11445:2012, la quale propone varie soluzioni: in questa analisi si considera l'unica opzione relativa ai consumi idrici reali, pertanto il volume utilizzato per ricaricare la vaschetta del WC è calcolato come il 30% del fabbisogno annuo reale.

Considerando che un anno medio si compone di 253 giorni lavorativi e 112 giorni festivi e ricordando che il consumo idrico medio pro capite, ottenuto dai risultati del monitoraggio, è pari a 134,01 litri per i giorni lavorativi e 159,48 litri per quelli festivi, la domanda idrica annua per la ricarica dello sciacquone è calcolata sulla base delle due equazioni di seguito riportate:

$$D_{PRO\ CAPITE} = 0{,}3 \cdot (134{,}01 \cdot 253 + 159{,}48 \cdot 112) = 0{,}3 \cdot 51{,}766 = 15{,}530m^3\,, \tag{6.87}$$

$$D = D_{PRO\ CAPITE} \cdot n^{\circ} residenti = 15{,}530 \cdot 5 = 77{,}651m^3\,. \tag{6.88}$$

Dai risultati ottenuti si può osservare che il volume (Q) di acqua piovana potenzialmente captabile in un anno dalla copertura dell'edificio è superiore alla domanda idrica annua (D) per il funzionamento del WC: questa considerazione permette quindi di comprendere che il rendimento del sistema RWH non presenterà limitazioni significative e sarà quindi superiore rispetto a quello ottenuto per l'edificio precedentemente analizzato.

Il dimensionamento del sistema di stoccaggio delle acque meteoriche si basa sul confronto diretto tra l'afflusso meteorico medio annuo (Q) e la domanda idrica annua per usi non potabili (D): il primo parametro da determinare è il volume utile (V_u) del serbatoio, calcolato in funzione del numero massimo di giorni siccitosi consecutivi. Quando però, come nel caso in esame, tale numero non è disponibile, il volume utile è assunto pari al 6% del valore minimo tra Q ed D; la precedente percentuale corrisponde a 22 giorni siccitosi consecutivi, dato che rispecchia le caratteristiche pluviometriche della zona oggetto di studio:

$$V_u = 0{,}06 \cdot \min(Q; D) = 0{,}06 \cdot \min(83{,}922;\ 77{,}651) = 0{,}06 \cdot 77{,}651 = 4{,}659 m^3 . \qquad (6.89)$$

Il volume ottimale (V_o) della cisterna è infine determinato correggendo il precedente valore per mezzo di un coefficiente di sicurezza adimensionale (C_s), pari a 1,50; il suo scopo è quello di garantire un notevole rendimento del sistema anche in presenza di variazioni significative dei regimi pluviometrici e delle modalità di impiego della risorsa idrica:

$$V_o = V_u \cdot C_s = 4{,}659 \cdot 1{,}50 = 6{,}989 m^3 . \qquad (6.90)$$

Siccome il precedente valore non corrisponde a nessun serbatoio disponibile in commercio, è stata selezionata la cisterna con la capacità immediatamente superiore: tale valore è pari a 7,800 m^3 ed è fornito dall'azienda italiana Rototec S.p.A; la migliore dislocazione della cisterna è quella in posizione interrata, in considerazione del notevole spazio disponibile nel cortile interno del condominio.

6.2.6 Simulazione numerica del bilancio idrico

Prima di eseguire la valutazione di fattibilità economica del sistema RWH, verrà determinata l'efficienza dello stesso; il bilancio idrico del serbatoio, per ogni mese dell'analisi, può essere effettuato previa conoscenza dei seguenti parametri di input:

- l'afflusso meteorico mensile è stato ricavato con la relazione: $Q = \varphi \cdot P \cdot A$;

- la domanda idrica mensile $(D_{MENSILE})$ è ipotizzata costante ed è quindi ottenuta dividendo la domanda idrica annua (D) per i 12 mesi dell'anno, ottenendo il seguente valore medio:

$$D_{MENSILE} = \frac{D}{12} = \frac{77{,}651}{12} = 6{,}471 m^3; \quad (6.91)$$

- il bilancio idrico mensile $(B_{MENSILE})$ si ottiene sottraendo all'afflusso meteorico mensile $(Q_{MENSILE})$ la domanda idrica mensile $(D_{MENSILE})$, come espresso dalla seguente equazione:

$$B_{MENSILE} = (Q - D)_{MENSILE}; \quad (6.92)$$

- il volume idrico recuperato mensilmente $(V_{R,MENSILE})$ è infine calcolato come il valore minimo tra la domanda mensile $(D_{MENSILE})$ e l'afflusso meteorico mensile $(Q_{MENSILE})$ e permette di valutare il risparmio idrico garantito dal sistema RWH per soddisfare la domanda di acqua per usi diversi dal consumo umano:

$$V_{R,MESE} = \min(Q_{MESE}, D_{MESE}). \quad (6.93)$$

Mese	**Altezza di pioggia** $h\ [mm]$	**Afflusso meteorico** $Q\ [m^3]$	**Domanda idrica** $D\ [m^3]$	**Bilancio idrico** $B\ [m^3]$	**Volume idrico recuperato** $V_R\ [m^3]$
Gennaio	43	4,059	6,471	-2,412	4,059
Febbraio	57	5,381	6,471	-1,090	5,381
Marzo	85	8,024	6,471	1,553	6,471
Aprile	98	9,251	6,471	2,780	6,471
Maggio	107	10,101	6,471	3,630	6,471
Giugno	77	7,269	6,471	0,798	6,471
Luglio	40	3,776	6,471	-2,695	3,776
Agosto	56	5,286	6,471	-1,185	5,286
Settembre	62	5,853	6,471	-0,618	5,853
Ottobre	99	9,346	6,471	2,875	6,471
Novembre	100	9,440	6,471	2,969	6,471
Dicembre	65	6,136	6,471	-0,335	6,136
Totale	889	83,922	77,651	6,271	69,317

Tabella 6.18: Bilancio idrico mensile e annuo del sistema RWH in studio.

Come si evince dalla precedente tabella, il bilancio idrico (B) del serbatoio presenta sia valori positivi che negativi: questo sta ad indicare che la cisterna sarà in grado di soddisfare completamente la domanda idrica dell'utenza dell'edificio per sei mesi l'anno, mentre nei restanti sei mesi sarà invece necessario ricorrere ai prelievi idrici dalla rete municipale; occorre inoltre sottolineare che per alcuni mesi il bilancio idrico è di poco inferiore a zero, rendendo quindi l'utenza quasi del tutto indipendente dall'acquedotto. Il mese caratterizzato dal bilancio idrico più sfavorevole è luglio, in quanto il volume delle acque piovane $(Q_{MENSILE})$ captate dalla copertura e quindi stoccate nella cisterna è tale da soddisfare solamente il 58,35% della domanda idrica mensile per gli utilizzi diversi dal consumo umano $(D_{MENSILE})$; il picco di efficienza è invece conseguito nei mesi di marzo, aprile, maggio, giugno, ottobre e novembre, per i quali l'afflusso meteorico è tale da garantire il 100,00% della domanda idrica.

A differenza di quanto ottenuto per il condominio, il volume idrico recuperato $(V_{R,MENSILE})$ grazie all'adozione del sistema RWH, riportato nell'ultima colonna della tabella sovrastante, coinciderà, a seconda dell'andamento pluviometrico, con l'afflusso meteorico mensile $(Q_{MENSILE})$ oppure con la domanda idrica mensile $(D_{MENSILE})$; inoltre, relativamente alla scala temporale annuale, poiché l'afflusso meteorico (Q) è superiore alla domanda idrica (D), si raggiungerà la condizione di sfioro dal serbatoio. Complessivamente, il sistema RWH trattato in questo caso studio risulterà notevolmente più vantaggioso rispetto a quello esaminato in precedenza.

Per valutare analiticamente il rendimento del sistema si utilizzano i due seguenti parametri funzionali:

- Indice di efficienza idrica, detto anche Water Saving o Affidabilità Volumetrica, che consente di valutare l'efficienza del risparmio annuale in base alla formulazione sottostante:

$$W_S = \frac{Volume\ \ idrico\ \ annuo\ \ recuperato}{Domanda\ \ idrica\ \ annua} \cdot 100 = \frac{V_R}{D} \cdot 100 = \frac{69{,}317}{77{,}651} \cdot 100 = 89{,}27\% . \qquad (6.94)$$

Il valore ottenuto fa sì che il sistema RWH in progetto, sulla base delle indicazioni riportate in tabella 3.9 del precedente capitolo, ricada all'interno della Classe di Efficienza Idrica *A* **,** garantendo pertanto un elevatissimo risparmio idrico. Questo risultato dimostra che la cisterna è in grado di soddisfare la quasi totalità della domanda idrica annua per gli utilizzi diversi dal consumo umano (D): ricordando infatti che quest'ultimo volume era stato valutato come il 30% della domanda idrica totale dell'edificio, si può evincere che il sistema RWH in esame è tale da ridurre la richiesta di acqua garantita dalla rete acquedottistica di un valore pari al 26,78%; questa percentuale è calcolata come segue:

$$Riduzione\ \ della\ \ domanda\ \ idrica\ \ totale = 0{,}8927 \cdot 30\% = 26{,}78\% . \qquad (6.95)$$

- Indice di riduzione dello sfioro, espresso come il complementare del cosiddetto overflow, ossia del volume annuo scaricato per troppopieno nella rete fognaria (O_F); quest'ultimo è calcolato per mezzo della seguente espressione:

$$O_F = \left(\frac{Afflusso\ \ annuo - Volume\ \ recuperato}{Afflusso\ \ annuo} \right) \cdot 100 = \left(\frac{83{,}922 - 69{,}317}{83{,}922} \right) \cdot 100 = 17{,}40\% . \quad (6.96)$$

E' quindi sufficiente determinare l'indice di riduzione dello sfioro come:

$$100 - O_F = 100 - 17{,}40 = 82{,}60\% . \quad (6.97)$$

Questo risultato esprime il concetto che circa un sesto dell'afflusso meteorico annuo viene automaticamente convertito in volume sfiorato nella rete fognaria; questo risultato può apparire nettamente peggiore rispetto a quello ottenuto nel capitolo precedente, per il quale gli sfiori erano nulli: in realtà, nella precedente casistica tale valore era dovuto esclusivamente al fatto che la domanda idrica era sempre superiore agli afflussi, con conseguente riduzione dell'efficienza del sistema RWH. Quanto ottenuto consente quindi di comprendere come, nella valutazione del bilancio idrico, occorra tenere in considerazione sia il rendimento del sistema di raccolta delle acqua piovane che gli sfiori in fognatura, in modo da garantire al contempo sia la massimizzazione del volume di acqua captato dalla copertura che la riduzione degli sprechi.

6.2.7 Valutazione economica di un sistema a doppio impianto

Per stabilire la possibile convenienza economica relativa all'installazione di un sistema RWH, occorre confrontare l'importo attuale per l'approvvigionamento idrico dalla rete acquedottistica municipale con i costi complessivi associati all'installazione di un serbatoio aggiuntivo per la raccolta delle acque piovane. Di seguito saranno quindi valutati gli oneri totali associati all'installazione di una cisterna, la cui vita utile è trentennale, in modo da confrontarli direttamente, sulla medesima scala temporale, con quelli ottenuti precedentemente in relazione al solo approvvigionamento idrico dall'acquedotto. Il costo complessivo è definito dalla somma di una quota fissa, associata alla costruzione e alla manutenzione del sistema RWH, e di una quota variabile, che è invece funzione del volume aggiuntivo di acqua di rete necessario per soddisfare la domanda idrica dell'utenza.

Complessivamente, il dimensionamento del serbatoio di raccolta delle acque meteoriche, di cui al paragrafo 4.5, ha condotto ad un volume pari a 7,800 m^3; la soluzione più idonea al caso in esame è riportata nella figura seguente:

Articolo	Capacità lt.	Ø cm	Altezza cm	Ø Coperchio cm	Coperchio	Prolunga	Golfer	Prezzo €
NPI 8000	7800	227	275	63	TAP710	PP 77	4	2600,00

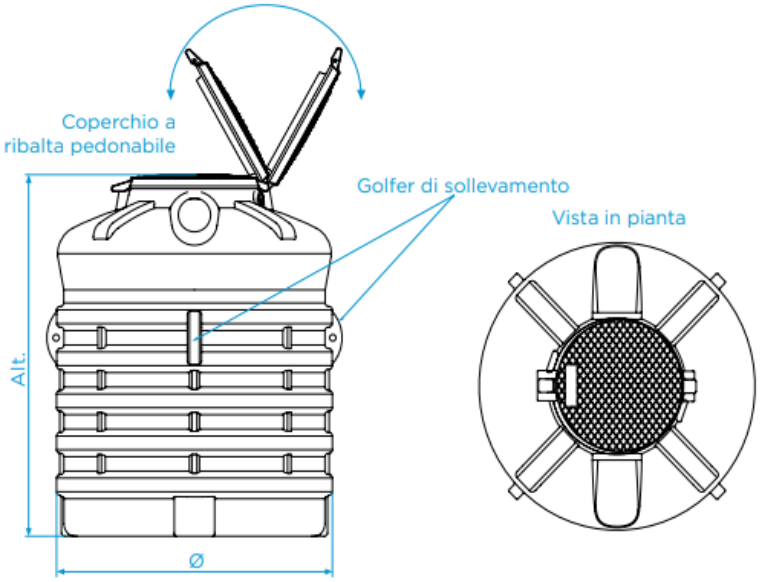

Figura 6.22: Caratteristiche, prezzo e forma della cisterna oggetto di studio [Fonte: www.rototec.it].

Il costo fisso viene valutato, per ogni unità abitativa, come la somma di tre quote fisse relative rispettivamente all'acquedotto, alla fognatura e alla depurazione e ammonta, per l'intero edificio, a 59,40 € relativamente all'anno 2019: tale valore è identico a quello precedentemente ottenuto in assenza del serbatoio per la raccolta delle acque meteoriche, poiché è indipendente dai consumi dell'utenza.

Per quanto riguarda invece i costi distribuiti, essi sono associati sia al fabbisogno idrico di acqua potabile garantito esclusivamente dall'acquedotto e pari al 70% della domanda complessiva (sulla base delle indicazioni della normativa italiana UNI/TS 11445:2012), che alla domanda idrica per utilizzi diversi dal consumo umano non soddisfatta dal serbatoio di stoccaggio: complessivamente, il volume richiesto alla rete acquedottistica ammonta al 73,22% della domanda idrica complessiva: questo valore, facendo riferimento all'espressione seguente, è calcolato sommando il 70% del fabbisogno idrico annuo, garantito esclusivamente dall'acquedotto, con il restante 3,22%, ottenuto dal confronto tra il volume idrico annuo recuperato (V_R) e la domanda idrica annua (D):

$$Percentuale\ H_2O\ fornita\ da\ acquedotto = 70\% + \left(\frac{77{,}651 - 69{,}317}{77{,}651} \cdot 30\%\right) = 73{,}22\%. \qquad (6.98)$$

La prima grandezza da determinare è il volume annuo della domanda idrica da acquedotto, calcolato a partire dai consumi pro capite; in particolare:

- il consumo medio pro capite di un giorno lavorativo è pari a: $0{,}7322 \cdot 134{,}01 = 98{,}12$ litri;
- il consumo medio pro capite di un giorno festivo è invece pari a: $0{,}7322 \cdot 159{,}48 = 116{,}77$ litri.

Considerando un intervallo temporale di 30 anni e ricordando che il numero medio di giorni lavorativi e festivi in un anno ammonta rispettivamente a 253 e 112, è possibile determinare il consumo idrico annuo totale per i 5 residenti dell'edificio; esso consente di calcolare la domanda annua di ogni unità abitativa in funzione del numero di residenti, in quanto i due appartamenti presentano la stessa estensione ma un differente numero di occupanti: un appartamento è infatti occupato da una sola persona, mentre l'altro appartamento è abitato da quattro persone.

Le tre espressione seguenti riportano la procedura applicata:

$$V = 5 \cdot (253 \cdot 98{,}12 + 112 \cdot 116{,}77) = 189{,}511 m^3; \tag{6.99}$$

$$V_{APPARTAMENTO\ 1} = \frac{1}{5} \cdot 189{,}511 = 37{,}902 m^3; \tag{6.100}$$

$$V_{APPARTAMENTO\ 2} = \frac{4}{5} \cdot 189{,}511 = 151{,}609 m^3. \tag{6.101}$$

Noti i volumi idrici annui prelevati da entrambi gli appartamenti, vengono ricavati i relativi costi annui: facendo riferimento al tariffario idrico riportato in tabella 3.4, risulta evidente che il primo appartamento rientra, relativamente ai soli prelievi dalla rete acquedottistica, nella fascia tariffaria agevolata (fascia 1), essendo i consumi inferiori a 60 m^3 annui, mentre il secondo appartamento passa, grazie all'installazione del sistema RWH, dalla fascia tariffaria di primo supero (fascia 3) alla fascia base (fascia 2), in quanto i consumi annui sono compresi tra 61 e 180 m^3.

Le due formule seguenti riportano i costi annui per le due unità abitative; questi importi vengono calcolati per mezzo di una sommatoria a scaglioni, fondata sulle diverse fasce tariffarie:

$$C_{APPARTAMENTO\ 1,ACQUEDOTTO} = 37{,}902 \cdot 0{,}411794 = 15{,}61€; \tag{6.102}$$

$$C_{APPARTAMENTO\ 2,ACQUEDOTTO} = 60 \cdot 0{,}411794 + 91{,}609 \cdot 0{,}653641 = 84{,}59€. \tag{6.103}$$

Complessivamente, il costo annuo associato al solo prelievo dalla rete acquedottistica vale:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,ACQUEDOTTO} = 15{,}61 + 84{,}59 = 100{,}20€. \tag{6.104}$$

Per ottenere il costo complessivo associato ai consumi è poi necessario prendere anche in considerazione le componenti riferite rispettivamente allo scarico nella rete fognaria e al sistema di depurazione delle acque reflue; a differenza della precedente quota, in questo caso gli importi sono privi di un tariffario idrico a scaglioni e valgono rispettivamente:

$$C_{APPARTAMENTO\ 1,FOGNATURA} = 37{,}902 \cdot 0{,}213161 = 8{,}08€; \quad (6.105)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ 2,FOGNATURA} = 151{,}609 \cdot 0{,}213161 = 32{,}32€; \quad (6.106)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ 1,DEPURAZIONE} = 37.902 \cdot 0{,}461843 = 17{,}50€; \quad (6.107)$$

$$C_{APPARTAMENTO\ 2,DEPURAZIONE} = 151{,}609 \cdot 0{,}461843 = 70{,}02€. \quad (6.108)$$

I costi variabili totali associati alle immissioni nella rete fognaria e alla depurazione valgono pertanto:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,FOGNATURA} = 8{,}08 + 32{,}32 = 40{,}40€; \quad (6.109)$$

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE,DEPURAZIONE} = 17{,}50 + 70{,}02 = 87{,}52€. \quad (6.110)$$

Il costo variabile associato all'intero edificio viene calcolato come somma delle tre componenti che fanno riferimento ai consumi idrici prelevati dalla rete acquedottistica, alle immissioni nella rete fognaria e ai volumi trattati dal sistema di depurazione, come indicato nella relazione seguente:

$$C_{VARIABILE\ \ TOTALE} = 100{,}20 + 40{,}40 + 87{,}52 = 228{,}12€. \quad (6.111)$$

Il costo totale è infine espresso dalla somma della quota fissa e di quella variabile:

$$C_{TOTALE} = C_{FISSO\ TOTALE} + C_{VARIABILE\ \ TOTALE} = 59{,}40 + 228{,}12 = 287{,}52€. \quad (6.112)$$

Considerando inoltre l'I.V.A. pari a 10% dell'imponibile, il costo complessivo per l'anno 2019 vale:

$$C_{TOTALE+I.V.A.} = 1{,}10 \cdot 287{,}52 = 316{,}27€. \quad (6.113)$$

Occorre infine considerare i costi iniziali per l'acquisto del serbatoio, pari a 2˙600,00 €; gli ulteriori costi sono associati alla pompa per il sollevamento dell'acqua piovana, al kit di pressurizzazione, al pozzetto con filtro autopulente e all'installazione dell'intero sistema e sono riportati sul sito internet della Rototec S.p.A.

Complessivamente, il costo iniziale ammonta a:

$$C_{INIZIALE} = C_{SERBATOIO} + C_{POMPA} + C_{PRESSURIZZAZIONE} + C_{POZZETTO} + C_{INSTALLAZIONE} =$$

$$= 2˙600{,}00 + 479{,}00 + 630{,}00 + 585{,}00 + 2˙000{,}00 = 6˙294{,}00€. \quad (6.114)$$

Il costo complessivo previsto per il 2019, anno di installazione del sistema RWH, è pertanto espresso dalla somma dei costi di installazione del sistema stesso $(6.294{,}00\ €)$ e di quelli fissi e variabili da corrispondere al gestore del Servizio Idrico Integrato $(316{,}27\ €)$, come indicato nella seguente espressione:

$$C_{2019} = C_{INIZIALE} + C_{TOTALE+I.V.A.} = 6.294{,}00 + 316{,}27 = 6.610{,}27€. \quad (6.115)$$

Occorre specificare che l'analisi economica soprariportata non ha considerato i costi energetici da sostenere annualmente per il pompaggio dell'acqua dalla cisterna di stoccaggio alle diverse apparecchiature idriche; essi costituiscono infatti un'aliquota secondaria se confrontata direttamente con i costi relativi all'installazione del sistema RWH e con quelli relativi alla fornitura idrica dalla rete acquedottistica. In ogni caso, è riportata una formula esemplificativa per la loro determinazione:

$$C_{POMPAGGIO} = Costo\ unitario\left[\frac{€}{KWh}\right] \cdot n°ore\ di\ utilizzo\left[\frac{h}{d}\right] \cdot Potenza\ \ pompa[KW] \cdot 365[d], \quad (6.116)$$

dove il numero di ore giornaliere di utilizzo della pompa è a sua volta ottenuto dal rapporto tra il volume di acqua prelevato quotidianamente dal serbatoio e la portata nominale dalla pompa, sulla base dell'equazione che segue:

$$n°ore\ di\ utilizzo[h] = \frac{V[m^3]}{Q_n\left[\frac{m^3}{h}\right]}. \quad (6.117)$$

Note le diverse grandezze, è possibile inserirle nelle due formulazioni precedenti in modo da determinare il costo annuo per il pompaggio dell'acqua:

$$n°ore\ di\ utilizzo[h] = \frac{0{,}519[m^3]}{3{,}6\left[\frac{m^3}{h}\right]} = 0{,}15h; \quad (6.118)$$

$$C_{POMPAGGIO} = 0{,}09\left[\frac{€}{KWh}\right] \cdot 0{,}15\left[\frac{h}{d}\right] \cdot 0{,}6[KW] \cdot 365[d] = 2{,}96€. \quad (6.119)$$

Il precedente valore costituisce una frazione minima rispetto alla spesa per la fornitura idrica dalla rete municipalizzata ed è pertanto trascurabile, in quanto influisce sul costo totale annuo per una percentuale pari a:

$$\frac{Costo_{POMPAGGIO}}{Costo_{TOTALE+I.V.A.}} = \frac{2{,}96}{316{,}27 + 2{,}96} \cdot 100 = \frac{2{,}96}{319{,}23} \cdot 100 = 0{,}927\%. \quad (6.120)$$

Ipotizzando che i consumi idrici dell'edificio e il suo numero di residenti siano costanti per tutta la durata dell'analisi, il costo totale annuo da corrispondere al gestore del Servizio Idrico Integrato è calcolato anche per l'intervallo temporale 2010-2018, ottenendo i risultati sottostanti:

Anno	Costo [€]	Anno	Costo [€]
2010	225,16	2015	286,52
2011	208,63	2016	304,44
2012	208,63	2017	293,19
2013	269,23	2018	316,27
2014	269,23	2019	316,27

Tabella 6.19: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% per il decennio 2010-2019.

I precedenti risultati sono diagrammati nel grafico sottostante, in cui viene riportata anche la retta interpolante, di equazione:

$$y = 12{,}844 \cdot x + 199{,}12\,, \tag{6.121}$$

dove la variabile indipendente x indica l'anno di riferimento, mentre la variabile dipendente y esprime invece il costo totale annuo relativo all'intero edificio in esame. In particolare, il coefficiente angolare della retta esprime il concetto che l'incremento medio del costo annuo per l'intera utenza è di poco inferiore a 13 €.

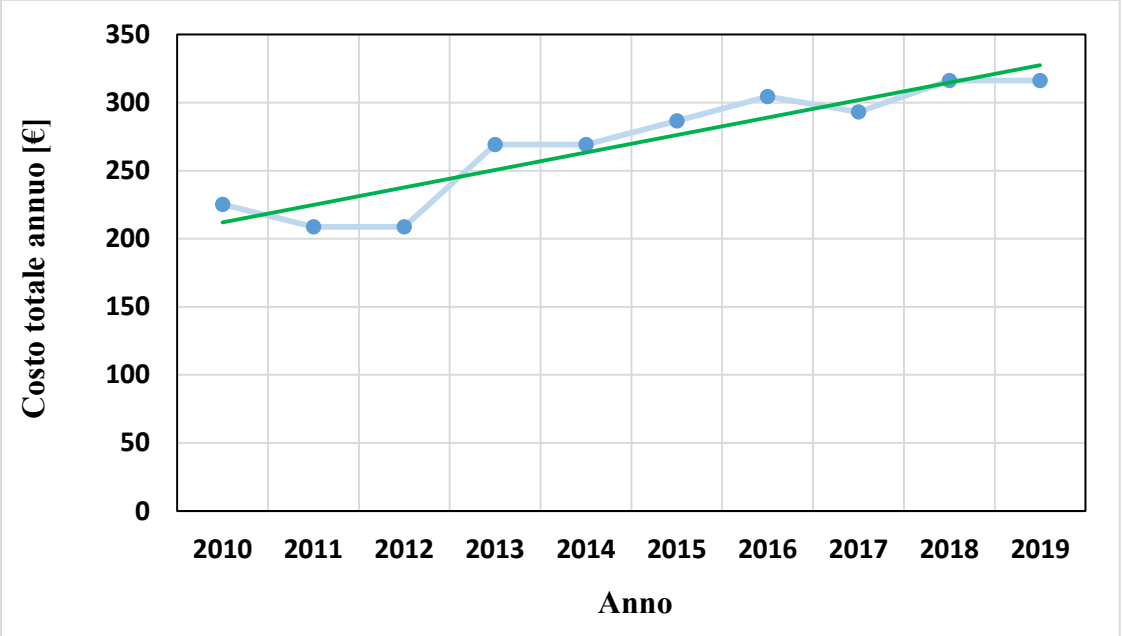

Figura 6.23: Costi totali annui per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica.

La retta interpolante è necessaria a determinare i costi totali annui per il trentennio 2019-2048, usato come riferimento: la sua equazione consente infatti di estrapolare i singoli costi annui e quindi il costo totale, da confrontare con quello precedentemente ottenuto per un impianto idrico tradizionale.

Nella tabella seguente sono riportati i singoli costi annui:

Anno	Costo [€]	Anno	Costo [€]
2019	316,27	2034	520,22
2020	340,40	2035	533,06
2021	353,25	2036	545,91
2022	366,09	2037	558,75
2023	378,94	2038	571,60
2024	391,78	2039	584,44
2025	404,62	2040	597,28
2026	417,47	2041	610,13
2027	430,31	2042	622,97
2028	443,16	2043	635,82
2029	456,00	2044	648,66
2030	468,84	2045	661,50
2031	481,69	2046	674,35
2032	494,53	2047	687,19
2033	507,38	2048	700,04

Tabella 6.20: Costi comprensivi di I.V.A. al 10% previsti per il trentennio 2019-2048.

I costi annui, visualizzabili nel diagramma seguente, possono essere sommati tra loro in modo da determinare il costo totale da corrispondere al gestore del Servizio Idrico Integrato nel trentennio 2019-2048, espresso dalla relazione sottostante:

$$C_{TOTALE,SERVIZIO\ \ IDRICO} = \sum_{i=1}^{30} C_i = 124{\cdot}078{,}24€ \,. \qquad (6.122)$$

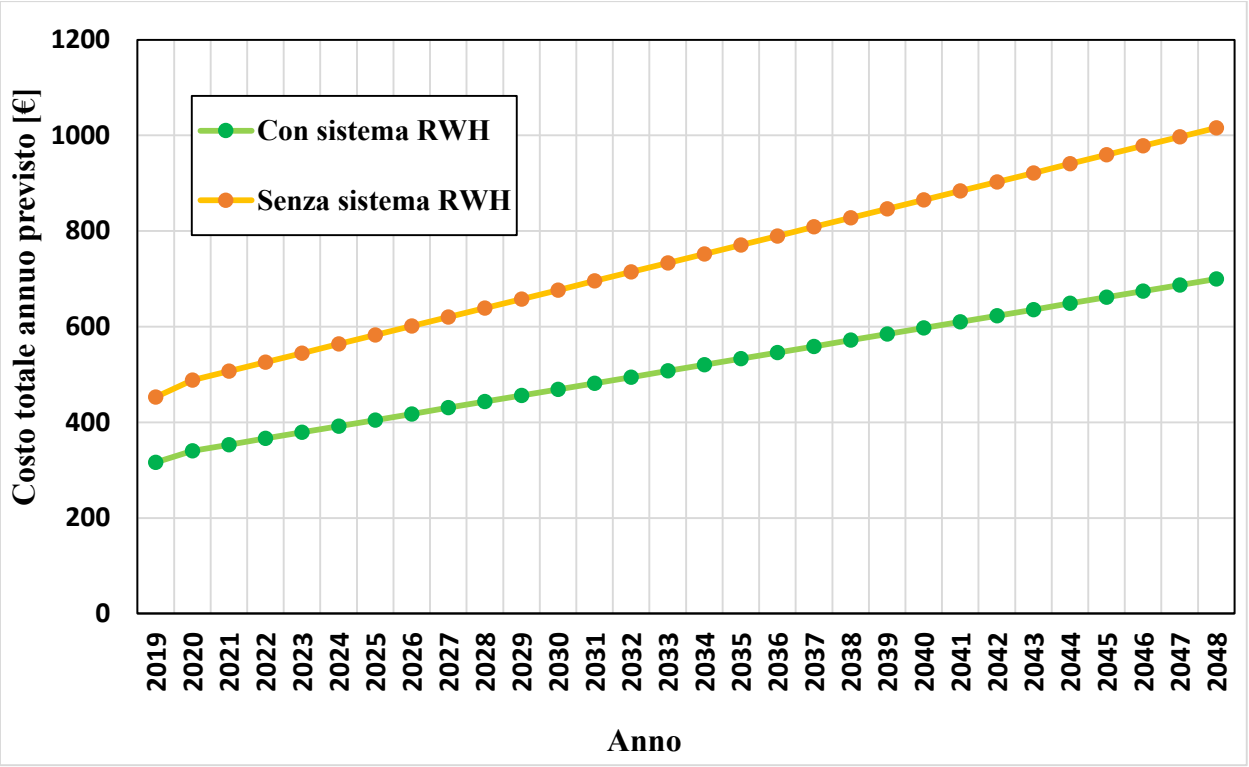

Figura 6.24: Costi totali annui previsti per la fornitura idrica dalla rete acquedottistica con o senza l'installazione del sistema RWH.

Occorre inoltre calcolare l'importo complessivo che i residenti della villa devono sostenere durante i 30 anni di vita utile del sistema RWH; tale valore si ottiene sommando ai costi per il Servizio Idrico Integrato quelli iniziali per l'installazione del sistema di raccolta delle acque piovane, come calcolato nell'equazione di seguito riportata:

$$C_{COMPLESSIVO} = C_{TOTALE,SERVIZIO\ IDRICO} + C_{INIZIALE} = 15'402{,}65 + 6'294{,}00 = 21'696{,}65€ . \qquad (6.123)$$

Infine, il beneficio finanziario (B) garantito dalla realizzazione del sistema RainWater Harvesting è espresso dalla differenza tra i costi che gli utenti della villa in esame devono sostenere rispettivamente in assenza e in presenza del sistema di raccolta, come indicato nella seguente formulazione:

$$B = C_{PRE\ RWH} - C_{POST\ RWH} = 22'261{,}27 - 21'696{,}65 = 564{,}62€ . \qquad (6.124)$$

Anche per la villa bifamiliare, così come precedentemente ottenuto per il condominio composto da 18 unità abitative, il risparmio garantito dal sistema RWH è superiore rispetto al costo iniziale necessario per l'installazione del sistema stesso.

Dopo aver esaminato le due opzioni di approvvigionamento idrico, è possibile eseguire il confronto diretto in termini di costi cumulati, che sono diagrammati nella figura sottostante:

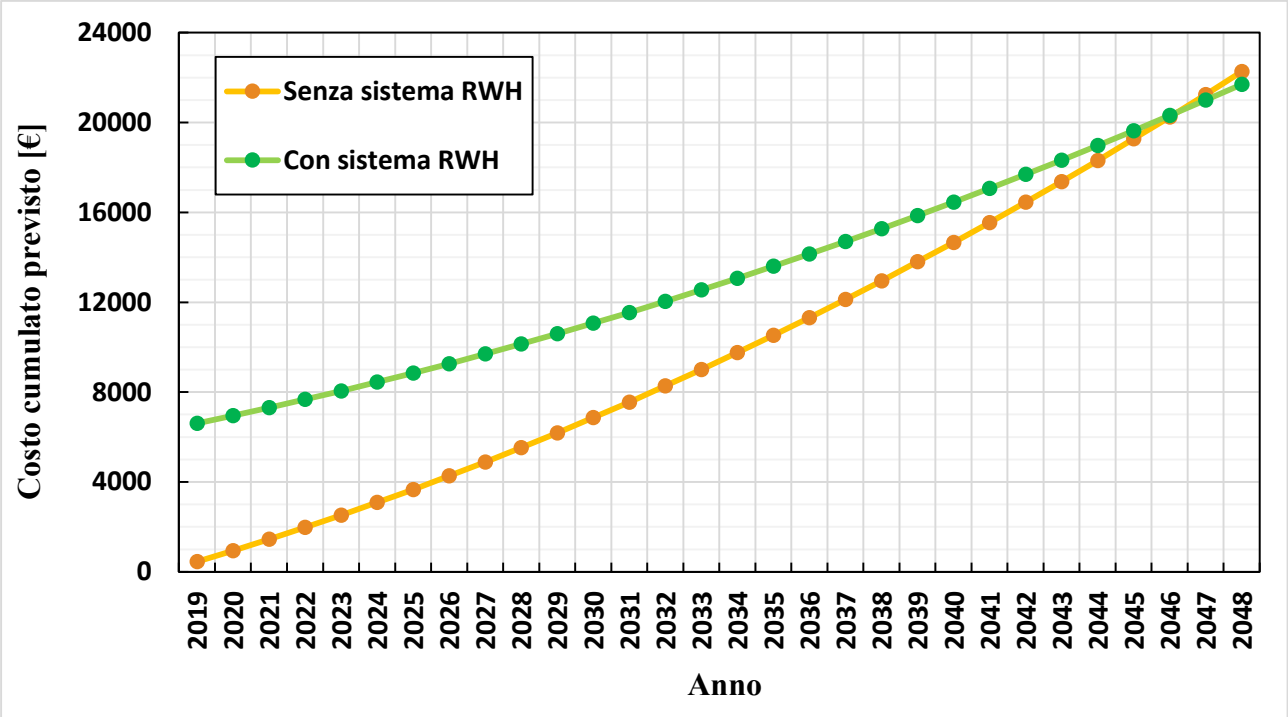

Figura 6.25: Costi cumulati previsti in caso di assenza o installazione del sistema RWH.

Come è possibile osservare dal grafico, l'installazione del sistema RainWater Harvesting risulta economicamente conveniente nel periodo trentennale 2019-2048 preso come riferimento per la valutazione; in particolare, l'anno in cui si consegue per la prima volta il risparmio economico per garantire l'approvvigionamento idrico dell'edificio è in questo caso il 2047, ossia il ventinovesimo anno di utilizzo del sistema RWH.

La raccolta e il successivo riutilizzo delle acque meteoriche risultano pertanto convenienti dal punto di vista economico e tale vantaggio si somma a quello ecologico-ambientale relativo al risparmio idrico. E' quindi possibile affermare che l'installazione di un sistema RainWater Harvesting risulta economicamente conveniente per diverse tipologie di edificio, che si differenziano tra loro per dimensioni e numero di residenti, producendo dei benefici finanziari apprezzabili in un intervallo temporale inferiore ai 30 anni.

7. Applicazione del modello di Pelak e Porporato (2016)

L'obiettivo di questo capitolo è quello di eseguire un confronto diretto, in termini di rendimento dei sistemi RainWater Harvesting per la raccolta delle acque piovane, facendo riferimento a due diverse metodologie di calcolo: la prima è stata esaminata nel capitolo precedente e considera la specifica tecnica italiana UNI/TS 11445:2012, mentre la seconda applica il modello di bilancio idrico proposto nel 2016 da Pelak e Porporato, analizzato dal punto di vista teorico all'interno del capitolo 3.
I due edifici residenziali in trattazione (edificio condominiale e villa residenziale) sono gli stessi già esaminati nel capitolo 6, in modo da mettere in evidenza le analogie e le differenze che sussistono tra i due metodi.

7.1 Applicazione del modello a due edifici residenziali di Mondovì

Nel precedente capitolo, l'applicazione della normativa italiana UNI/TS 11445:2012 aveva fornito, in fase di dimensionamento, le due seguenti capacità dei serbatoi per lo stoccaggio delle acque meteoriche:

- Condominio: $V = 37{,}800\, m^3$;
- Villa: $V = 7{,}800\, m^3$.

Questi valori saranno utilizzati come dati di input per la determinazione dell'efficienza dei due sistemi RWH con il metodo elaborato da Pelak e Porporato; l'espressione analitica che definisce il rendimento dei sistemi, sulla base di quanto indicato al capitolo 3, è la seguente:

$$\frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle} = D_c \cdot (1 - p_0), \tag{7.1}$$

dove i singoli termini presentano i seguenti significati:

- $H \left[m^3 \cdot d^{-1} \right]$: tasso di domanda idrica soddisfatta dal serbatoio; questo parametro viene espresso in funzione del tasso di domanda idrica $h \left[m^3 \cdot d^{-1} \right]$, ossia del volume di acqua richiesta quotidianamente dall'utenza dell'edificio per l'utilizzo dei WC, con la formula seguente:

$$H(c) = \begin{cases} 0 & \text{se} \quad \begin{cases} c = 0 \\ c > 0; \end{cases} \\ h \end{cases} \tag{7.2}$$

- $c\ [-]$: volume di accumulo normalizzato, ottenuto dividendo il volume di acqua stoccata nel serbatoio per la capacità V del medesimo;
- $\phi\ [-]$: coefficiente di afflusso;
- $A\ [m^2]$: area efficace della superficie di captazione, proiettata sull'orizzontale;
- $\langle R \rangle = \lambda \cdot \alpha\ [mm \cdot d^{-1}]$: tasso di precipitazione medio, espresso dal prodotto della frequenza di pioggia (λ) per l'altezza dell'evento medio di pioggia (α);
- $D_c = \dfrac{h}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle}\ [-]$: indice di domanda del serbatoio, espresso dal rapporto tra il tasso di domanda idrica (h) e il tasso di precipitazione $(\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle)$ che può essere catturata dalla copertura in un evento medio di pioggia;
- $p_0 = \dfrac{1 - D_c}{e^{\gamma \cdot \left(\frac{1}{D_c} - 1\right)} - D_c}\ [-]$: probabilità che la cisterna sia vuota;
- $\gamma = \dfrac{V}{\phi \cdot A \cdot \alpha}\ [-]$: volume adimensionale del serbatoio, ottenuto dividendo la sua capacità (V) per il volume di acqua piovana $(\phi \cdot A \cdot \alpha)$ che vi confluisce in un evento medio di pioggia.

Nella tabella sottostante sono elencate le grandezze di base per la determinazione dell'efficienza dei sistemi RWH, relative alla superficie di captazione delle acque meteoriche e alla domanda idrica dell'intero edificio:

Parametro	***Simbolo***	***Valore***
Coefficiente di afflusso	$\phi\ [-]$	0,8
Area della copertura della villa	$A\ [m^2]$	118
Area della copertura del condominio	$A\ [m^2]$	570
Domanda idrica della villa	$h\ [m^3 \cdot d^{-1}]$	0,200
Domanda idrica del condominio	$h\ [m^3 \cdot d^{-1}]$	1,480

Tabella 7.1: Parametri di base per il calcolo del rendimento dei sistemi RWH.

In particolare, la domanda idrica giornaliera (h) dell'intera utenza è stata valutata facendo riferimento alla seguente tabella proposta dalla normativa UNI/TS 11445:2012:

Utilizzo	*Fabbisogno giornaliero pro capite*	*Fabbisogno annuale*
WC nelle abitazioni	$40\,l$	-
WC negli uffici	$30\,l$	-
WC negli edifici scolastici	$20\,l$	-
Lavatrice	$15\,l$	-
Irrigazione per 1 m² di area a verde	-	$300\ \frac{l}{m^2}$

Tabella 7.2: Fabbisogni idrici per usi domestici diversi dal consumo umano.

I parametri pluviometrici sono stati invece valutati a partire dalle statistiche elaborate dall'Istat: l'Istituto nazionale di statistica ha infatti fornito, nell'ambito di una rilevazione dei dati meteo-climatici e idrologici, il valore medio dell'altezza di pioggia annua e la media annua di giorni piovosi per la serie temporale quarantennale 1951-1990: a partire da essi, sono state ricavate l'altezza media di pioggia di ogni singolo evento meteorico (α) e la frequenza di pioggia (λ), necessarie per il calcolo del tasso di pioggia $(\langle R \rangle)$.

Le formule utilizzate per il calcolo dei due parametri sono le seguenti:

$$\alpha = \frac{altezza\ \ di\ \ pioggia\ \ media\ \ annua}{media\ \ annua\ \ di\ \ giorni\ \ piovosi} \qquad [mm]; \tag{7.3}$$

$$\lambda = \frac{media\ \ annua\ \ di\ \ giorni\ \ piovosi}{numero\ \ di\ \ giorni\ \ in\ \ un\ \ anno} \qquad \left[\frac{1}{d}\right]. \tag{7.4}$$

Nella tabella seguente sono riassunti i vari termini impiegati:

Città	*Altezza di pioggia annua* $[mm]$	*Giorni piovosi annui* $[-]$	*Altezza media di pioggia* $\alpha\ [mm]$	*Frequenza di pioggia* $\lambda\ [d^{-1}]$	*Tasso di precipitazione* $\langle R \rangle\ [mm \cdot d^{-1}]$
Mondovì	889	93	9,56	0,25	2,39

Tabella 7.3: Parametri climatici per il calcolo del rendimento dei sistemi RWH.

Le grandezze elencate nelle tabelle 7.1 e 7.3 consentono, unitamente ai volumi delle due cisterne, di determinare l'efficienza dei sistemi RWH, che viene valutata sulla base dei tre parametri adimensionali sotto tabulati:

- γ [–]: Volume adimensionale della cisterna;
- D_c [–]: Indice di domanda della cisterna;
- p_0 [–]: Probabilità che la cisterna sia vuota.

Città	*Edificio*	γ [–]	D_c [–]	p_0 [–]
Mondovì	Villa	8,643	0,886	0,053
	Condominio	8,671	1,358	0,285

Tabella 7.4: Parametri adimensionali per il calcolo dell'efficienza dei sistemi RWH.

Dopo aver determinato tutti i parametri, sfruttando l'espressione 7.1 introdotta in apertura del capitolo, è possibile determinare i rendimenti dei due sistemi RWH, che sono elencati nella tabella sottostante:

Rendimento del sistema	*Villa*	*Condominio*
$D_c \cdot (1 - p_0)$	0,8394	0,9710

Tabella 7.5: Rendimenti dei sistemi RWH oggetto di studio.

Questi risultati possono essere visualizzati sul seguente diagramma:

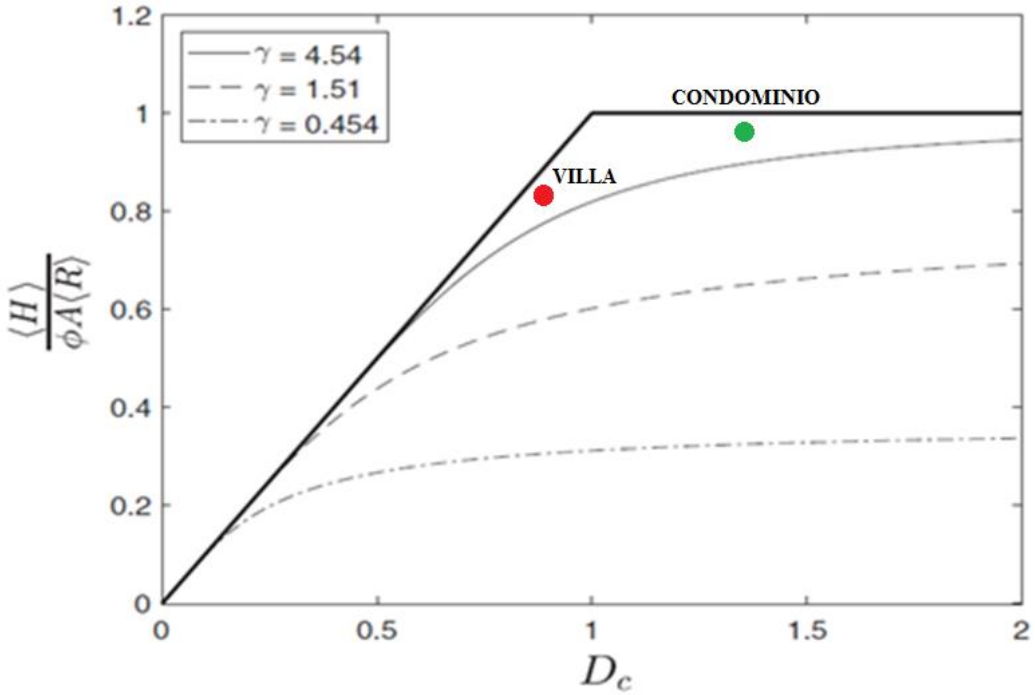

Figura 7.1: Rendimenti dei sistemi RWH installati per villa e condominio di Mondovì.

Come è possibile osservare, l'efficienza dei sistemi RainWater Harvesting è particolarmente elevata per entrambe le categorie di edificio, a dimostrazione che il dimensionamento dei serbatoi, eseguito sulla base delle indicazioni fornite dalla specifica tecnica italiana UNI/TS 11445:2012, ha portato a risultati soddisfacenti: il rendimento, espresso come complementare degli sfiori, è infatti nettamente superiore all'80% per entrambi i casi ed è inoltre maggiore per l'edificio condominiale piuttosto che per la villa bifamiliare.

Occorre poi considerare che i due valori di efficienza appena individuati risultano essere del tutto in linea con quelli determinati nel capitolo precedente facendo riferimento alla norma italiana UNI/TS 11445:2012: l'indice di riduzione dello sfioro O_F valeva infatti rispettivamente:

- Condominio: $O_F = 0\%$;
- Villa: $O_F = 17{,}40\%$.

L'indice di riduzione dello sfioro O_F può pertanto essere visto come il complementare dell'affidabilità $D_c \cdot (1 - p_0)$ determinata applicando il modello di Pelak e Porporato: entrambe le metodologie sono quindi ampiamente valide per eseguire la stima del rendimento di un qualsiasi sistema RWH in termini di riduzione degli sfiori nella rete fognaria.

7.2 Applicazione del modello a edifici analoghi dislocati sul territorio nazionale

Lo stesso procedimento applicato in precedenza per la determinazione dell'efficienza della cisterna può essere esteso anche ad ambiti diversi e in particolare ad altre realtà nazionali: l'obiettivo è infatti quello di comprendere come i risultati possano variare in funzione dei diversi input, in modo da realizzare uno studio più ampio e completo. In particolare, sono stati esaminati dieci sistemi RWH per soddisfare la domanda idrica per l'utilizzo del WC, installati nelle cinque città di Genova, Trento, Torino, Potenza e Cagliari, sia per una villa bifamiliare su due piani che per un condominio di medie dimensioni con 18 appartamenti. La scelta di queste città è motivata dal fatto che esse sono situate a quote e latitudini differenti, con conseguenti variazioni dei regimi pluviometrici:

- Genova si affaccia sul mar Ligure e ricade, relativamente alla piovosità, nella media dei climi mediterranei; le estati sono calde e le temperature medie risultano superiori a +22 °C, mentre le precipitazioni sono complessivamente molto abbondanti, rendendo Genova uno dei capoluoghi più piovosi d'Italia;
- Trento è collocata ai piedi delle Alpi orientali e ha un clima tipicamente continentale, con estati calde ed inverni freddi; le precipitazioni sono invece particolarmente abbondanti e soprattutto molto frequenti;
- Torino sorge su un territorio pianeggiante, distante poche decine di chilometri in linea d'aria dalla catena alpina occidentale; la città è caratterizzata da un clima temperato umido con estati calde, mentre gli inverni risultano invece moderatamente freddi, asciutti e spesso soleggiati; l'altezza di pioggia annua è di poco superiore alla media italiana;
- Potenza è situata su un territorio montuoso lungo la dorsale appenninica; presenta un clima mediterraneo e montano, pertanto freddo e nevoso d'inverno, nonché tiepido e secco d'estate; le precipitazioni medie annue sono invece al di sotto della media nazionale;
- Cagliari si affaccia sul mar Tirreno ed è caratterizzata da un clima tipicamente mediterraneo, con inverni miti ed estati calde e siccitose: l'altezza annua di pioggia è di poco superiore a 40 cm e corrisponde pertanto a circa la metà della media nazionale.

Le ipotesi di base sono le seguenti:

- il consumo idrico giornaliero è quello stabilito dalla specifica tecnica italiana UNI/TS 11445:2012;
- il numero di residenti per le due tipologie di abitazione è ipotizzato uguale a quello dei due edifici di Mondovì, ossia 5 residenti per la villa bifamiliare e 37 residenti per il condominio.

Per quanto riguarda il dimensionamento dei serbatoi di raccolta delle acque piovane installati sul territorio nazionale, si fa riferimento a quanto previsto dalla normativa UNI/TS 11445:2012; più in dettaglio, per determinare la capacità dei serbatoi e quindi il loro rendimento è richiesta la conoscenza dei tre seguenti aspetti:

- regime pluviometrico dell'area di interesse: la grandezza di riferimento è rappresentata dalla precipitazione media annua, espressa in millimetri; essa viene calcolata attraverso una media delle altezze annuali, a partire da una serie storica di precipitazioni di durata almeno trentennale, in modo da garantire un'elevata significatività statistica dei risultati e per eseguire al contempo una valutazione rigorosa delle prestazioni del sistema;
- dimensioni e caratteristiche della superficie di captazione delle acque meteoriche: la superficie di raccolta è definita dalla proiezione orizzontale dell'edificio, comprese le sporgenze della copertura, indipendentemente dalla sua forma ed inclinazione; nel caso in cui la superficie di captazione coincida con una parte della copertura, si dovrà considerare solamente la proiezione orizzontale di questa porzione. Occorre inoltre valutare il coefficiente di afflusso, o coefficiente di assorbimento, definito come il rapporto adimensionale tra il volume defluito nella sezione di chiusura della superficie di captazione e il volume totale di pioggia caduta sulla copertura: tale parametro è ipotizzato costante durante tutto l'evento di pioggia e può assumere teoricamente tutti i valori compresi tra 0 e 1;
- domanda idrica annua dell'intero edificio, che può essere determinata facendo riferimento alla tabella 7.2 proposta dalla normativa italiana UNI/TS 11445:2012 e applicata precedentemente per calcolare i consumi idrici dei due edifici di Mondovì.

Noti il regime pluviometrico, le dimensioni della copertura impermeabile piana e il coefficiente di afflusso, è possibile determinare l'afflusso meteorico annuo per mezzo della seguente espressione:

$$Q = \varphi \cdot P \cdot A\,, \tag{7.5}$$

con:

- $Q\,[l]$: deflusso meteorico annuo;
- $\varphi\,[-]$: coefficiente di afflusso;
- $P\,[mm]$: precipitazione annua, espressa in millimetri o analogamente in $\frac{l}{m^2}$ e ricavata dai dati pluviometrici trentennali (1971-2000) forniti dal sito internet dell'Istat;
- $A\,[m^2]$: proiezione orizzontale della superficie di captazione.

Per quanto riguarda il coefficiente di afflusso (φ), si fa riferimento ai valori stabiliti dalla normativa vigente UNI/TS 11445:2012, variabili in funzione della tipologia della copertura:

Tipologia di copertura	*Coefficiente di afflusso* (φ)
Copertura impermeabile a falda	0,80
Copertura impermeabile piana	0,70
Copertura permeabile	0,50
Superficie impermeabile a terra	0,70

Tabella 7.6: Coefficienti di afflusso per diverse tipologie di copertura.

La seguente tabella riporta i valori del volume medio annuo di pioggia per i 10 casi analizzati, sotto l'ipotesi che l'area della proiezione orizzontale della copertura valga rispettivamente 118 m^2 per la villa e 570 m^2 per il condominio:

Città	*Edificio*	$\varphi\ [-]$	$P\ [mm]$	$A\ [m^2]$	$Q\ [l]$
Genova	***Villa***	0,8	1˙270,7	118	119˙954,1
	Condominio	0,8	1˙270,7	570	579˙439,2
Trento	***Villa***	0,8	901,5	118	85˙101,6
	Condominio	0,8	901,5	570	411˙084,0
Torino	***Villa***	0,8	872,1	118	82˙326,2
	Condominio	0,8	872,1	570	397˙677,6
Potenza	***Villa***	0,8	677,2	118	63˙927,7
	Condominio	0,8	677,2	570	308˙803,2
Cagliari	***Villa***	0,8	403,5	118	38˙090,4
	Condominio	0,8	403,5	570	183˙996,0

Tabella 7.7: Deflusso meteorico annuo calcolato con la norma UNI/TS 11445:2012.

Il volume di acqua necessaria per soddisfare la domanda domestica annua non associata al consumo umano è calcolato impiegando la seguente relazione proposta dalla normativa UNI/TS 11445:2012:

$$R = n \cdot r \cdot 365\,, \tag{7.6}$$

con:

- $R\ [l]$: domanda idrica annua;
- $n\ [-]$: numero di abitanti serviti dall'impianto domestico;
- $r\ [l \cdot ab^{-1} \cdot d^{-1}]$: domanda idrica giornaliera pro capite;
- $365\,[d]$: numero di giorni in un anno.

Nei dieci casi in esame si è ipotizzato che la domanda idrica sia relativa al solo utilizzo dei WC, in modo da uniformare la valutazione dell'efficienza dei sistemi a quella precedentemente eseguita per gli edifici residenziali situati nella città di Mondovì, confrontando successivamente i risultati ottenuti. La seguente tabella riassume brevemente i valori del consumo idrico annuo relativo alle due tipologie di edificio:

Edificio	$n\ [-]$	$r\left[\frac{l}{ab\cdot d}\right]$	$Giorni\ annui\ [d]$	$R\ [l]$
Villa bifamiliare	5	40	365	73˙000
Condominio	37	40	365	540˙200

Tabella 7.8: Calcolo del fabbisogno idrico annuo per usi diversi dal consumo umano.

Per dimensionare il serbatoio occorre innanzitutto calcolare il volume utile dello stesso; tale valore, sulla base delle indicazioni fornite dalla normativa UNI/TS 11445:2012, è espresso dalla relazione seguente:

$$V_u = \min(Q;R)\cdot F_P, \tag{7.7}$$

con:

- $V_u\ [l]$: volume utile della cisterna di accumulo;
- $Q\ [l]$: deflusso meteorico annuo;
- $R\ [l]$: richiesta idrica annua per utilizzi domestici diversi dal consumo umano;
- $F_P\ [-]$: coefficiente adimensionale, ottenuto dal rapporto tra il numero massimo di giorni consecutivi annui con assenza di precipitazioni e il numero di giorni in un anno; i valori relativi alle cinque città italiane sono pari a:

Città	***Genova***	***Trento***	***Torino***	***Potenza***	***Cagliari***
n° massimo di giorni consecutivi annui senza pioggia	24	26	27	25	30
$F_P\ [-]$	0,0658	0,0712	0,0740	0,0685	0,0822

Tabella 7.9: Calcolo del coefficiente adimensionale F_P per le cinque città italiane.

Il volume ottimale del sistema di accumulo, tale da massimizzare il rendimento dell'intero impianto di raccolta ed utilizzo delle acque meteoriche, viene infine determinato correggendo il volume utile

tramite un coefficiente di sicurezza; quest'ultimo termine viene introdotto per far sì che il sistema mostri un'efficienza notevole, anche in presenza di variazioni significative sia dei regimi pluviometrici che delle modalità di impiego della risorsa idrica:

$$V_o = V_u \cdot C_s , \tag{7.8}$$

con:

- $V_o\ [l]$: volume ottimale della cisterna di accumulo;
- $V_u\ [l]$: volume utile della cisterna di accumulo;
- $C_s\ [-]$: coefficiente di sicurezza, pari a 1,50.

E' quindi possibile determinare, combinando opportunamente le due relazioni (7.7) e (7.8) definite in precedenza, il volume ottimale dei diversi serbatoi per l'accumulo dell'acqua piovana; i risultati ottenuti sono riassunti nella tabella sottostante:

Città	***Edificio***	$Q\ [l]$	$R\ [l]$	$F_P\ [-]$	$C_s\ [l]$	$V_o\ [l]$
Genova	***Villa***	119˙954,1	73˙000	0,0658	1,50	7˙205,1
	Condominio	579˙439,2	540˙200	0,0658	1,50	53˙317,7
Trento	***Villa***	85˙101,6	73˙000	0,0712	1,50	7˙796,4
	Condominio	411˙084,0	540˙200	0,0712	1,50	43˙903,8
Torino	***Villa***	82˙326,2	73˙000	0,0740	1,50	8˙103,0
	Condominio	397˙677,6	540˙200	0,0740	1,50	44˙142,2
Potenza	***Villa***	63˙927,7	73˙000	0,0685	1,50	6˙568,6
	Condominio	308˙803,2	540˙200	0,0685	1,50	31˙729,5
Cagliari	***Villa***	38˙090,4	73˙000	0,0822	1,50	4˙696,6
	Condominio	183˙996,0	540˙200	0,0822	1,50	22˙686,7

Tabella 7.10: Calcolo del volume ottimale delle cisterne di accumulo.

Siccome i valori precedenti sono relativi a serbatoi non disponibili in commercio, sono state di conseguenza selezionate le seguenti cisterne, fornite dall'azienda italiana Rototec S.p.A., che presentano le capacità immediatamente superiori rispetto a quelle ricavate dai precedenti calcoli:

Città	*Edificio*	$V_o\ [l]$	$V_{o,COMMERCIALE}\ [l]$	*Nome commerciale*
Genova	***Villa***	7˙205,1	7˙800	NPI8000
	Condominio	53˙317,7	58˙800	ITC 60000 02
Trento	***Villa***	7˙796,4	7˙800	NPI8000
	Condominio	43˙903,8	44˙100	ITC 45000 01
Torino	***Villa***	8˙103,0	9˙020	MT9000
	Condominio	44˙142,2	45˙150	IT 45000
Potenza	***Villa***	6˙568,6	7˙800	NPI8000
	Condominio	31˙729,5	36˙000	ITSIR 36075
Cagliari	***Villa***	4˙696,6	5˙000	SIR 5075
	Condominio	22˙686,7	23˙100	IT 22000

Tabella 7.11: Determinazione del serbatoio commerciale per i diversi casi di studio.

In aggiunta ai valori precedentemente ottenuti, occorre considerare anche quelli elencati nella tabella seguente, relativi alla superficie di captazione delle acque meteoriche e alla domanda idrica dell'intero edificio:

Parametro	*Simbolo*	*Valore*
Coefficiente di afflusso	$\phi\ [-]$	0,8
Area della copertura della villa	$A\ [m^2]$	118
Area della copertura del condominio	$A\ [m^2]$	570
Domanda idrica della villa	$h\ [m^3 \cdot d^{-1}]$	0,200
Domanda idrica del condominio	$h\ [m^3 \cdot d^{-1}]$	1,480

Tabella 7.12: Parametri di base per il calcolo del rendimento dei sistemi RWH.

Per quanto riguarda infine i parametri pluviometrici, si è fatto riferimento alle statistiche elaborate dall'Istat: l'Istituto nazionale di statistica ha fornito infatti, nell'ambito di una rilevazione dei dati meteo-climatici e idrologici, il valore medio dell'altezza di pioggia annua e la media annua di giorni piovosi per la serie temporale trentennale 1971-2000: a partire da essi, sono stati ricavati l'altezza media di pioggia (α) e la frequenza di pioggia (λ), il cui prodotto fornisce il tasso di pioggia $(\langle R \rangle)$.

Nella tabella seguente sono riassunti i vari termini impiegati:

Città	*Altezza di pioggia annua* $[mm]$	*Giorni piovosi annui* $[-]$	*Altezza media di pioggia* $\alpha\ [mm]$	*Frequenza di pioggia* $\lambda\ [d^{-1}]$	*Tasso di precipitazione* $\langle R \rangle\ [mm \cdot d^{-1}]$
Genova	1˙270,7	81	15,69	0,22	3,4518
Trento	901,5	112	8,05	0,31	2,4955
Torino	872,1	74	11,79	0,20	2,358
Potenza	677,2	91	7,44	0,25	1,86
Cagliari	403,5	59	6,84	0,16	1,0944

Tabella 7.13: Parametri climatici per il calcolo del rendimento dei sistemi RWH.

I valori riportati in tabella 7.13 indicano le possibili casistiche pluviometriche che possono essere osservate sul territorio italiano, passando da tassi di precipitazione elevati dove le piogge sono più intense e frequenti (nord Italia) fino a valori molto bassi per latitudini inferiori, dove il clima è invece tipicamente insulare.

Le grandezze elencate nelle tre tabelle precedenti risultano di fondamentale importanza per determinare l'efficienza del sistema, che viene valutata definendo precedentemente i tre parametri adimensionali sotto tabulati:

- $\gamma\ [-]$: Volume adimensionale della cisterna;
- $D_c\ [-]$: Indice di domanda della cisterna;
- $p_0\ [-]$: Probabilità che la cisterna sia vuota.

Parametro	*Edificio*	*Genova*	*Trento*	*Torino*	*Potenza*	*Cagliari*
$\gamma\ [-]$	Villa	5,266	10,264	8,104	11,106	7,744
	Condominio	8,218	12,014	8,398	10,611	7,406
$D_c\ [-]$	Villa	0,614	0,849	0,898	1,139	1,936
	Condominio	0,940	1,301	1,376	1,745	2,966
$p_0\ [-]$	Villa	0,014	0,028	0,063	0,158	0,489
	Condominio	0,080	0,242	0,295	0,430	0,664

Tabella 7.14: Parametri adimensionali per il calcolo dell'efficienza dei sistemi RWH.

Dopo aver determinato tutti i parametri, sfruttando l'espressione 7.1 introdotta in apertura del capitolo e di seguito riportata, è possibile combinarli per calcolare i rendimenti dei sistemi RWH, che sono elencati nella tabella sottostante:

$$\frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle} = D_c \cdot (1 - p_0). \tag{7.1}$$

Rendimento del sistema	*Genova*	*Trento*	*Torino*	*Potenza*	*Cagliari*
Villa	0,6050	0,8251	0,8415	0,9593	0,9884
Condominio	0,8649	0,9849	0,9703	0,9954	0,9951

Tabella 7.15: Rendimenti dei diversi sistemi RWH oggetto di studio.

Questi risultati possono essere visualizzati sui due diagrammi seguenti, che riportano i valori di efficienza dei sistemi RWH installati rispettivamente in una villa bifamiliare e in un condominio da 18 unità immobiliari:

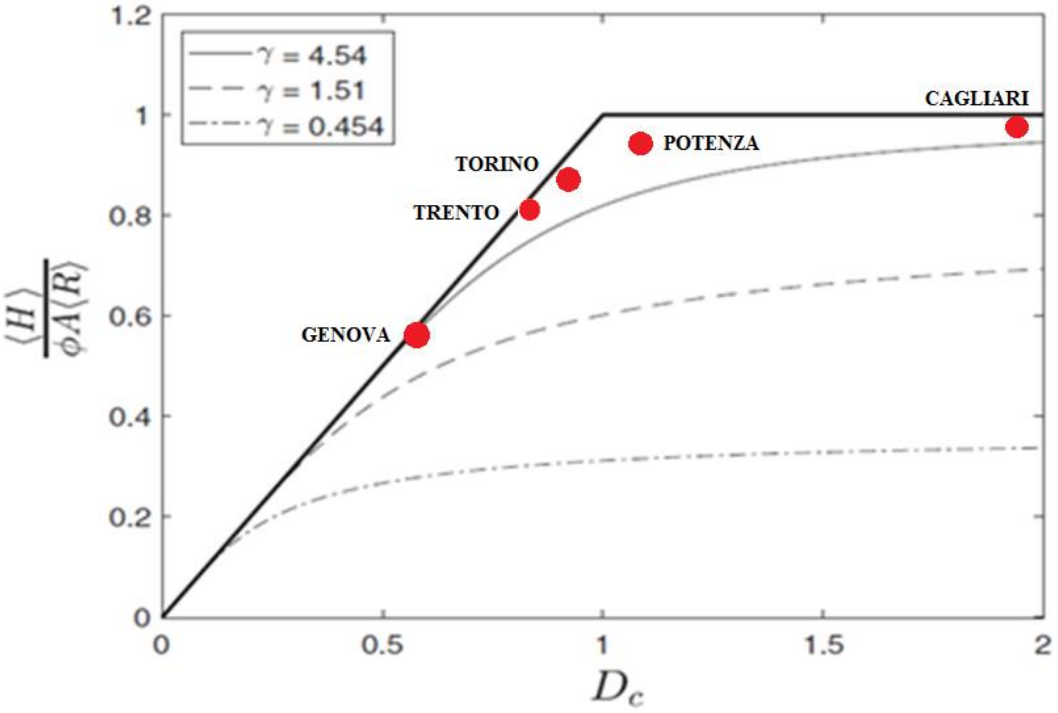

Figura 7.2: Rendimenti dei sistemi RWH installati nelle ville di 5 città italiane.

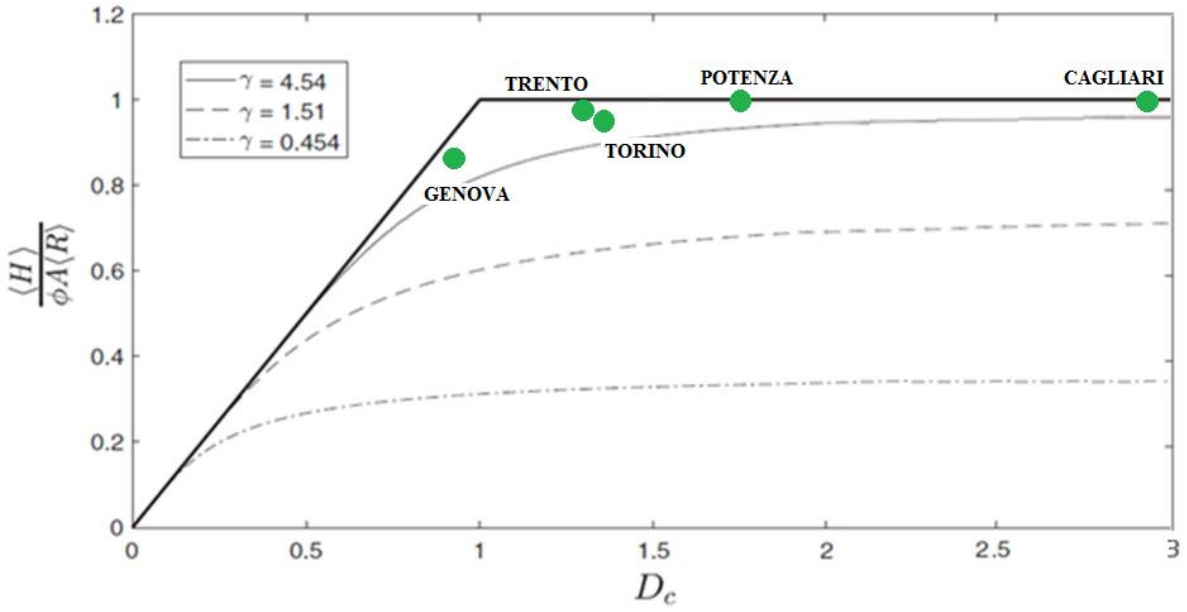

Figura 7.3: Rendimenti dei sistemi RWH installati nei condomini di 5 città italiane.

I valori ottenuti permettono di constatare che l'efficienza dei sistemi RWH installati aumenta progressivamente spostandosi da regioni caratterizzate da precipitazioni intense e frequenti verso zone contraddistinte invece da climi piuttosto siccitosi, raggiungendo il rendimento massimo nel caso di Cagliari. Il precedente risultato è da attribuire, a parità del numero di residenti, dell'area di copertura e del consumo idrico giornaliero, ai regimi pluviometrici, che nel caso del capoluogo sardo risultano essere meno consistenti rispetto alle altre quattro città italiane, con conseguente minore volume sfiorato dalla cisterna; il tasso di sfioro normalizzato costituisce infatti, sulla base dell'equazione:

$$\frac{\langle Q \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle} = 1 - \frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle}, \tag{7.9}$$

il complementare dell'efficienza dei sistemi.

Si può inoltre osservare che, prendendo come riferimento la stessa città, il rendimento risulta maggiore per il condominio piuttosto che per l'edificio bifamiliare: tale differenza, ad eccezione della sola città di Cagliari, dove il delta di rendimento è pari solamente allo 0,67%, diventa particolarmente evidente per tutte le altre quattro realtà, con discrepanze che crescono progressivamente e raggiungono valori massimi dell'ordine del 16% e del 26% rispettivamente per Trento e per Genova: questo risultato si presenta conforme con quello precedentemente ottenuto per i sistemi RWH installati per i due edifici di Mondovì e permette di dedurre che al crescere dello sviluppo verticale dell'edificio e quindi dei suoi residenti, mantenendo inalterate tutte le altre grandezze, aumenta di conseguenza anche il rendimento del sistema RWH installato.

L'ultima osservazione è infine quella relativa ad un confronto tra le efficienze: si osserva infatti che i sistemi RainWater Harvesting installati per i due edifici residenziali di Mondovì presentano rendimenti simili a quelli dei sistemi RWH analoghi di Torino. Le due città distano infatti tra loro solamente 75 km e presentano pertanto parametri pluviometrici simili. La tabella seguente evidenzia, a dimostrazione di quanto precedentemente affermato, l'analogia che sussiste tra i regimi pluviometrici delle due città e i rendimenti dei sistemi in trattazione:

Città	***Tasso di precipitazione*** $\langle R \rangle \left[mm \cdot d^{-1} \right]$	***Rendimento sistema RWH villa***	***Rendimento sistema RWH condominio***
Torino	2,358	0,8415	0,9703
Mondovì	2,39	0,8394	0,9710

Tabella 7.16: Regimi pluviometrici delle 2 città e rendimenti dei 4 sistemi RWH.

8. Applicazione del modello di Tsihrintzis et al. (2013-2017)

L'obiettivo di questo capitolo è quello di effettuare un'ulteriore valutazione dell'efficienza di un sistema RainWater Harvesting per lo stoccaggio delle acque meteoriche: in questo caso sarà considerato il modello di bilancio idrico a scala temporale giornaliera proposto inizialmente da Trihrintzis e Baltas (2013-2014) e perfezionato in seguito da Londra (2015-2017), che è stato definito dal punto di vista teorico all'interno del capitolo 4. L'applicazione verterà sugli stessi sistemi RWH installati nei due edifici residenziali di Mondovì, già considerati nei capitoli 6 e 7 applicando rispettivamente la specifica tecnica italiana UNI/TS 11445:2012 ed il modello di Pelak e Porporato: questa scelta è motivata dal fatto di voler eseguire un confronto diretto tra le tre diverse metodologie di valutazione, in modo da individuare le analogie e le eventuali differenze sussistenti.

L'equazione del bilancio idrico di un serbatoio RWH impiegata nel modello è la seguente:

$$S(t) = S(t-1) + R(t) - D(t) = S(t-1) + \Delta S(t), \tag{8.1}$$

con:

- $S(t)\ [m^3]$: volume stoccato nella cisterna al termine del t-esimo giorno;
- $S(t-1)\ [m^3]$: volume raccolto al termine del $(t-1)$-esimo giorno;
- $R(t)\ [m^3]$: volume di acqua piovana quotidianamente immagazzinata dal sistema RWH;
- $D(t)\ [m^3]$: domanda idrica giornaliera dell'intera utenza;
- $\Delta S(t)$: variazione giornaliera del volume immagazzinato.

Gli otto parametri di input necessari per l'applicazione del modello sono quelli sotto elencati:

- $C\ [-]$: coefficiente di deflusso;
- $A\ [m^2]$: area di raccolta delle acque piovane;
- $P(t)\ [mm]$: altezza giornaliera di precipitazione;
- $P_{eff}(t)\ [mm]$: altezza giornaliera di pioggia efficace;
- $N_{cap}[-]$: numero di residenti dell'edificio;
- $q\ [l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}]$: consumo idrico giornaliero pro capite;
- $p\ [\%]$: percentuale del consumo idrico giornaliero soddisfatta dalla cisterna;
- $V_{TANK}\ [m^3]$: capacità della cisterna.

Tra le precedenti grandezze, occorre focalizzare l'attenzione sulle quattro seguenti:

- $P(t)$: l'altezza giornaliera di precipitazione è stata fornita dalla banca dati meteorologica disponibile sul sito internet dell'Arpa Piemonte. In particolare, si è scelto di prendere in esame i valori giornalieri di pioggia dell'anno 2015, in quanto è caratterizzato da condizioni pluviometriche paragonabili a quelle medie della zona oggetto di studio: l'altezza annua di pioggia, pari ad $861\,mm$, è infatti di poco inferiore a quella monitorata per l'intervallo temporale 1951-1990, in cui è stato invece registrato un valore pari a $889\,mm$;
- $P_{eff}(t) = P(t) - 0{,}33$: l'altezza giornaliera di pioggia efficace è ottenuta sottraendo all'altezza complessiva le acque di prima pioggia, corrispondenti ai primi $0{,}33\,mm$ caduti sulla copertura dell'edificio durante un evento meteorico. Nel caso particolare in cui $P(t) < 0{,}33mm$, allora l'altezza di pioggia efficace $P_{eff}(t)$ sarà pari a zero;
- q: la domanda idrica giornaliera pro capite è stata calcolata come valore medio dei consumi pro capite valutati tra il 18 novembre e il 15 dicembre 2019, ossia nei 28 giorni che costituiscono l'intero intervallo temporale in cui è stato eseguito, sia per il condominio che per la villa bifamiliare, il monitoraggio delle richieste idriche (riportato al capitolo 6);
- p: la percentuale del consumo idrico giornaliero soddisfatto dal serbatoio è pari al 30% della domanda idrica giornaliera complessiva: questo valore fa riferimento ai soli prelievi idrici per l'utilizzo del WC ed è in accordo con quanto previsto dalla specifica tecnica UNI/TS 11445:2012.

Dopo aver determinato tutti i parametri, è possibile esprimere i volumi in ingresso e in uscita dal sistema sulla base delle due equazioni sottostanti:

$$R(t) = 10^{-3} \cdot C \cdot A \cdot P_{eff}(t), \tag{8.2}$$

$$D(t) = 10^{-3} \cdot N_{cap} \cdot q \cdot \left(\frac{p}{100}\right). \tag{8.3}$$

L'obiettivo dello studio è quello di determinare il coefficiente di affidabilità R_c del sistema RWH, espresso dal rapporto tra il numero di giorni in cui l'approvvigionamento idrico è garantito esclusivamente dalla cisterna per lo stoccaggio delle acque meteoriche e il numero complessivo dei giorni della serie temporale utilizzati per effettuare l'analisi, come indicato nell'espressione seguente:

$$R_c = \frac{\sum(giorni\ \ senza\ \ utilizzo\ \ di\ \ acqua\ \ della\ \ rete\ \ acquedottistica)}{\sum(numero\ \ di\ \ giorni\ \ della\ \ serie\ \ temporale\ \ considerata)}. \tag{8.4}$$

Il precedente parametro consente pertanto di effettuare una stima del rendimento del sistema solamente in maniera indiretta, in quanto quest'ultimo non viene espresso in funzione del volume garantito, nell'intero intervallo temporale considerato, dall'approvvigionamento idrico alternativo ma relativamente al numero di giorni in cui l'intero edificio non viene servito, neanche parzialmente, dalla rete acquedottistica municipale.

Il volume di acqua piovana immagazzinata giorno per giorno nella cisterna è determinato per mezzo di un processo di tipo iterativo, che parte dalla condizione di stoccaggio iniziale $S(t-1)=S_0$: tale volume può assumere tutti i valori compresi tra un minimo di $S_0=0$ nel caso di serbatoio inizialmente vuoto e un massimo pari a $S_0=V_{\max}$ nel caso in cui esso sia invece pieno. Nella presente analisi è stata selezionata la condizione iniziale:

$$S_0=0\,, \tag{8.5}$$

per far sì che i risultati ottenuti siano coerenti con le condizioni pluviometriche del territorio considerato. Occorre infatti osservare che, a prescindere dal volume di acqua piovana inizialmente stoccata, la condizione finale a cui si perviene è quella di serbatoio vuoto: l'ipotesi $S_0=0$ consente pertanto di ottenere il valore corretto dell'indice di affidabilità R_c, senza alterare i risultati.

L'algoritmo iterativo, impiegato per calcolare il quantitativo di acqua stoccata quotidianamente, è quello previsto dagli autori del modello:

$$\begin{cases} if\ \left(S(t-1)+\Delta S(t)\right)>V_{TANK} \quad then \quad S(t)_{TANK}=V_{TANK}\,, \\ if\ \left(S(t-1)+\Delta S(t)\right)<V_{TANK} \quad then \quad S(t)_{TANK}=0 \quad else \quad S(t)=S(t)_{TANK}=S(t-1)+\Delta S(t), \end{cases} \tag{8.6}$$

dove il termine $S(t)_{TANK}$ indica il volume di acqua disponibile nella cisterna al giorno t. In particolare, la prima disequazione definisce la condizione di serbatoio pieno, con eventuale sfioro, mentre la seconda fa invece riferimento ad un serbatoio vuoto oppure parzialmente pieno.

Qualora il serbatoio sia pieno, il volume $O(t)$ sfiorato quotidianamente dallo stesso e defluente verso la rete fognaria è calcolato con il seguente algoritmo:

$$if\ \ S(t)\geq V_{TANK} \quad then \quad O(t)=S(t)-V_{TANK} \quad else \quad O(t)=0\,. \tag{8.7}$$

Nel caso in cui il volume di acqua immagazzinata sia invece inadeguato per garantire la domanda idrica $D(t)$, allora quest'ultima sarà soddisfatta, anche solo parzialmente, dalla rete acquedottistica pubblica $T(t)$, ed è calcolato come segue:

$$if\ \left(S(t)<D(t)\right) \quad then \quad T(t)=D(t)-S(t)_{TANK} \quad else \quad T(t)=0\,. \tag{8.8}$$

8.1 Applicazione del modello al sistema RWH del condominio di Mondovì

Per stimare il coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH sono state considerate diverse estensioni (A) della superficie di copertura, variabili tra 490 e 650 m^2, nonché differenti capacità (V_{TANK}) del serbatoio di accumulo delle acque meteoriche, comprese tra 30 e 52 m^3, prendendo in considerazione i dati giornalieri di pioggia relativi all'anno 2015, in quanto sono i più rappresentativi, in termini di altezza di precipitazione annua, per definire le normali condizioni pluviometriche della zona considerata.

Nella tabella sottostante sono elencati tutti i parametri di input da implementare nel modello:

Grandezza	***Simbolo***	***Valori***								
Coefficiente di deflusso	$C\ [-]$	0,8								
Area della copertura	$A\ [m^2]$	490	510	530	550	570	590	610	630	650
Numero di residenti	$N_{cap}\ [-]$	37								
Consumo idrico giornaliero pro capite	$q\ [l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}]$	148,14								
Percentuale di domanda idrica soddisfatta dalla cisterna	$p\ [\%]$	30								
Volume della cisterna	$V_{TANK}\ [m^3]$	30			37,8			45		52

Tabella 8.1: Parametri necessari per definire il coefficiente di affidabilità R_c del sistema RWH installato per il condominio.

I precedenti dati, unitamente ai 365 valori giornalieri dell'altezza di precipitazione efficace $P_{eff}(t)$, sono stati dunque implementati all'interno di un generico foglio di calcolo Excel, in modo da determinare il coefficiente di affidabilità R_c del sistema RainWater Harvesting: questo parametro definisce in maniera indiretta, ossia facendo riferimento al numero di giorni in cui la domanda dell'utenza è soddisfatta unicamente dal sistema RWH, l'efficienza dello stesso nel ridurre i prelievi idrici dalla rete acquedottistica per l'utilizzo dei diversi apparecchi idrici (in questo caso del WC).

I valori ottenuti possono essere riportati sul diagramma sottostante, che definisce i quattro andamenti che il coefficiente R_c può assumere facendo variare l'area del tetto e la capacità della cisterna:

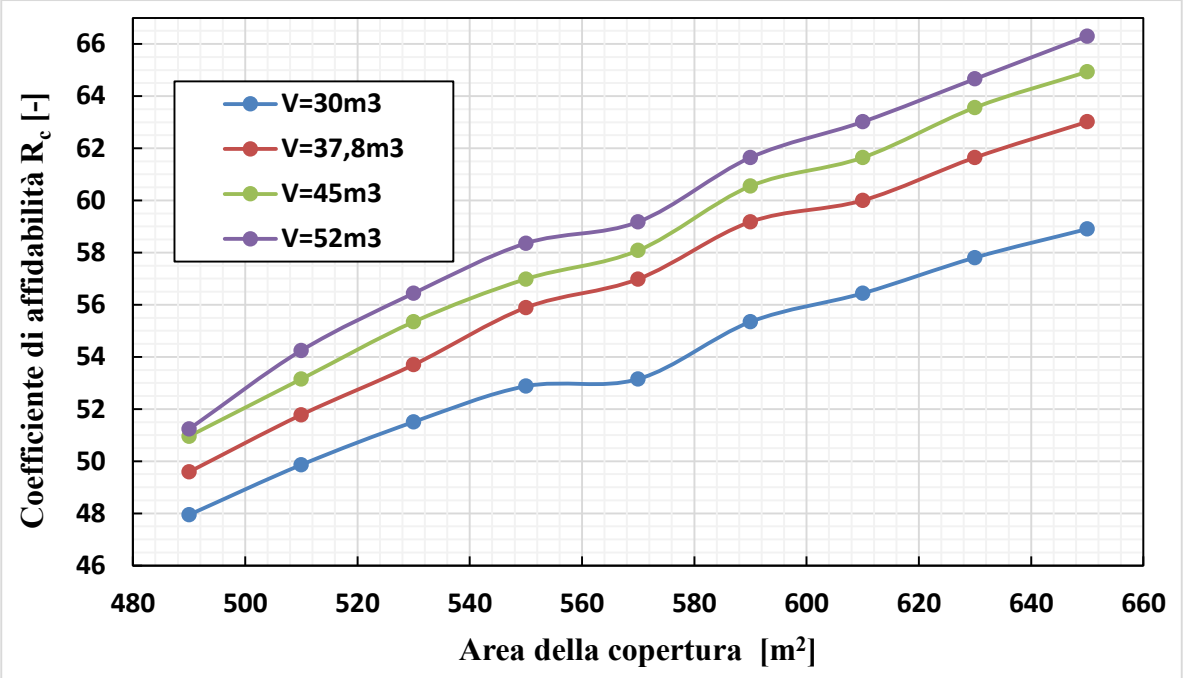

Figura 8.1: Andamento del coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH installato per il condominio al variare dell'area del tetto e del volume della cisterna.

Più in dettaglio, la tabella seguente riporta le efficienze che il sistema RWH può assumere per ognuna delle 36 configurazione esaminate:

	$V = 30m^3$	$V = 37{,}8m^3$	$V = 45m^3$	$V = 52m^3$
$A = 490m^2$	47,95%	49,59%	50,96%	51,23%
$A = 510m^2$	49,86%	51,78%	53,15%	54,25%
$A = 530m^2$	51,51%	53,70%	55,34%	56,44%
$A = 550m^2$	52,88%	55,89%	56,99%	58,36%
$A = 570m^2$	53,15%	56,99%	58,08%	59,18%
$A = 590m^2$	55,34%	59,18%	60,55%	61,64%
$A = 610m^2$	56,44%	60,00%	61,64%	63,01%
$A = 630m^2$	57,81%	61,64%	63,56%	64,66%
$A = 650m^2$	58,90%	63,01%	64,93%	66,30%

Tabella 8.2: Valori del coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH del condominio in funzione dell'estensione (A) della copertura e della capacità (V) del serbatoio.

Come si può osservare dal grafico riportato in figura 8.1, l'affidabilità del sistema RainWater Hasvesting installato per il condominio aumenta all'aumentare dell'area della copertura, nonché al crescere della capacità del serbatoio di stoccaggio delle acque meteoriche. E' inoltre possibile notare che la massima efficienza ottenibile con i due parametri di input $\left(490m^2 \le A \le 650m^2;\ 30m^3 \le V \le 52m^3\right)$ è di poco superiore al 66%, determinando un sistema in grado di soddisfare solo parzialmente l'intera domanda idrica dell'utenza per utilizzi diversi dal consumo umano $\left(p = 30\%\right)$: rendimenti superiori sono pertanto conseguibili unicamente impiegando serbatoi di dimensioni maggiori, con conseguente incremento dei costi, oppure coperture con estensione superiore a $650\,m^2$, che risultano però poco diffuse sul territorio oggetto di studio. L'affidabilità dei sistemi RWH è in generale moderatamente bassa e, più dettagliatamente, è compresa nel seguente intervallo: $48\% \le R_c \le 66\%$; i precedenti valori risulteranno inoltre maggiori oppure minori, facendo riferimento rispettivamente ad anni più piovosi oppure più siccitosi di quello che è stato considerato (2015).

L'efficienza $\left(R_c\right)$ pari al 50% può essere generalmente conseguita con tetti di estensione limitata $\left(A \ge 490m^2\right)$ e con cisterne di capacità relativamente elevata $\left(V \ge 45m^3\right)$; lo stesso risultato può essere anche ottenuto installando serbatoi con un volume notevolmente inferiore $\left(V \ge 30m^3\right)$, in abbinamento a coperture con area $A \ge 530m^2$.

Per raggiungere invece un'efficienza $\left(R_c\right)$ del 55% occorre installare sistemi RWH con serbatoi di capacità contenuta $\left(V \ge 30m^3\right)$ relativamente a tetti con estensione intermedia $\left(A \ge 590m^2\right)$; un'altra modalità con cui può essere conseguito lo stesso rendimento consiste invece nell'installare cisterne più capienti $\left(V \ge 45m^3\right)$ per condomini con tetti di medio-piccole dimensioni $\left(A \ge 530m^2\right)$.

Un rendimento $\left(R_c\right)$ pari al 60% può essere raggiunto a partire da una delle due seguenti condizioni:

- $V = 37{,}8m^3,\ A = 610m^2$;
- $V = 45m^3,\ A = 590m^2$.

Occorre infine sottolineare che, considerando lo stesso condominio preso in esame all'interno del capitolo 6 nel primo caso studio $\left(A = 570m^2,\ V = 37{,}8m^3\right)$, il rendimento del sistema RWH risulta pari a $R_c = 56{,}99\%$: questo valore definisce pertanto un sistema che è in grado di soddisfare il 100% della domanda idrica per l'utilizzo del WC solamente per 208 giorni in un anno caratterizzato da condizioni pluviometriche standard.

8.2 Applicazione del modello al sistema RWH della villa bifamiliare di Mondovì

In maniera analoga al caso precedentemente analizzato, per stimare il coefficiente di affidabilità (R_c) del secondo sistema RWH sono state considerate diverse estensioni (A) della superficie di copertura, variabili tra 70 e 150 m^2, nonché differenti capacità (V_{TANK}) della cisterna per l'accumulo delle acque meteoriche, comprese tra 4 e 10 m^3. Anche in questa analisi si è fatto riferimento alle altezze giornaliere di pioggia relative all'anno 2015: esse risultano infatti le più rappresentative, in termini di precipitazione annua, per definire le reali condizioni pluviometriche medie della zona considerata.

Nella seguente tabella sono elencati i parametri di input che devono essere implementati nel modello:

Grandezza	***Simbolo***	***Valori***								
Coefficiente di deflusso	$C\ [-]$	0,8								
Area della copertura	$A\ [m^2]$	70	80	90	100	110	118	130	140	150
Numero di residenti	$N_{cap}\ [-]$	5								
Consumo idrico giornaliero pro capite	$q\ [l \cdot d^{-1} \cdot p^{-1}]$	141,29								
Percentuale di domanda idrica soddisfatta dalla cisterna	$p\ [\%]$	30								
Volume della cisterna	$V_{TANK}\ [m^3]$	4			6		7,8		10	

Tabella 8.3: Parametri necessari per definire il coefficiente di affidabilità R_c del sistema RWH installato per la villa bifamiliare.

I precedenti dati, unitamente ai 365 valori dell'altezza giornaliera di precipitazione efficace $P_{eff}(t)$, possono essere implementati in un generico foglio di calcolo Excel, in modo da determinare il coefficiente di affidabilità R_c del sistema di stoccaggio delle acque meteoriche: tale parametro definisce indirettamente l'efficienza nella riduzione dei prelievi idrici dalla rete acquedottistica per l'utilizzo delle apparecchiature idriche (in questo caso del WC).

I valori ottenuti possono essere riportati sul diagramma sottostante, che definisce i quattro andamenti che il coefficiente R_c può assumere facendo variare l'area della copertura e il volume del serbatoio:

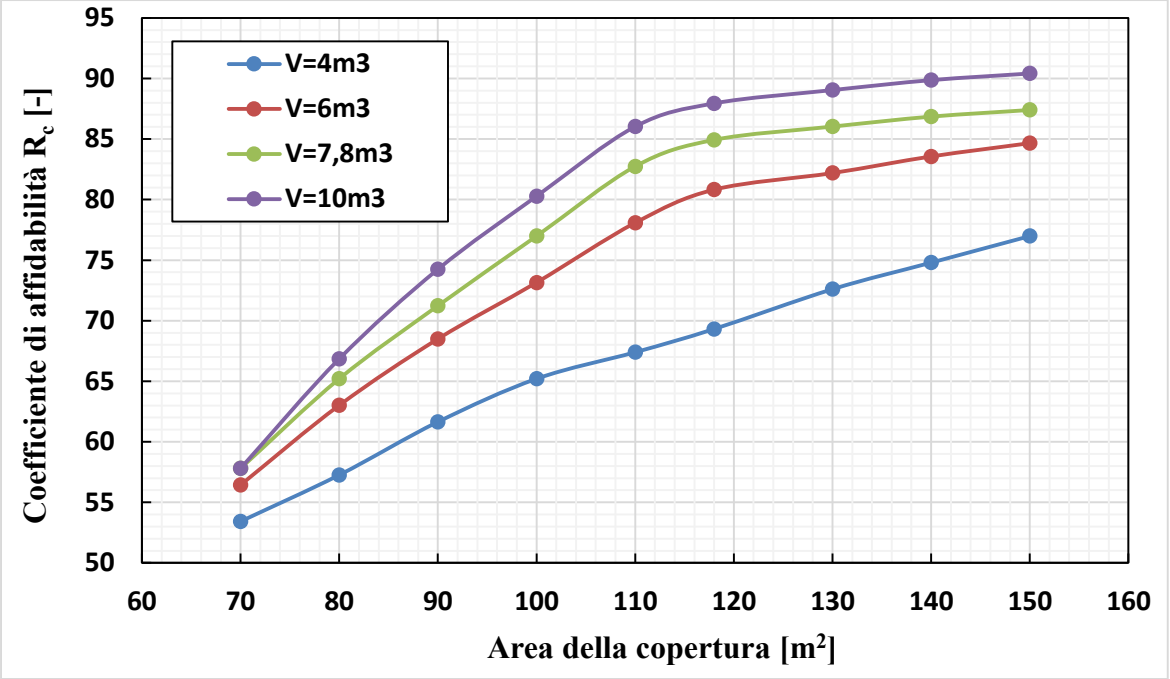

Figura 8.2: Coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH installato per la villa bifamiliare al variare dell'area del tetto e del volume della cisterna.

Più in dettaglio, la tabella seguente riporta le efficienze che il sistema RWH può assumere per ognuna delle 36 configurazione esaminate:

	$V = 4m^3$	$V = 6m^3$	$V = 7{,}8m^3$	$V = 10m^3$
$A = 70m^2$	53,42%	56,44%	57,81%	57,81%
$A = 80m^2$	57,26%	63,01%	65,21%	66,85%
$A = 90m^2$	61,64%	68,49%	71,23%	74,25%
$A = 100m^2$	65,21%	73,15%	76,99%	80,27%
$A = 110m^2$	67,40%	78,08%	82,74%	86,03%
$A = 118m^2$	69,32%	80,82%	84,93%	87,95%
$A = 130m^2$	72,60%	82,19%	86,03%	89,04%
$A = 140m^2$	74,79%	83,56%	86,85%	89,86%
$A = 150m^2$	76,99%	84,66%	87,40%	90,41%

Tabella 8.4: Valori del coefficiente di affidabilità (R_c) del sistema RWH della villa in funzione dell'estensione (A) della copertura e della capacità (V) del serbatoio.

Il grafico riportato in figura 8.2 esprime il concetto che l'affidabilità del sistema RainWater Hasvesting installato per la villa aumenta all'aumentare della superficie di copertura, nonché al crescere della capacità della cisterna per la raccolta delle acque meteoriche. Si osserva inoltre che il massimo valore del coefficiente di affidabilità (R_c) conseguibile in funzione dei due parametri di input $(70m^2 \le A \le 150m^2;\ 4m^3 \le V \le 10m^3)$ è pari al 90,41%: questo risultato garantisce quindi un elevato grado di soddisfacimento dell'intera domanda idrica dell'utenza per usi diversi dal consumo umano $(p = 30\%)$. Valori superiori del rendimento sono pertanto conseguibili, in maniera analoga a quanto osservato per il condominio, tramite l'utilizzo di cisterne più capienti, con conseguente aumento dei costi di installazione e per l'acquisto dell'intero impianto, o attraverso l'impiego di coperture con estensione superiore a $150\ m^2$, le quali risultano però poco comuni sul territorio oggetto di studio. Il coefficiente di affidabilità (R_c) assume, per una villa edificata sul territorio di Mondovì, valori compresi in un intervallo particolarmente esteso, più precisamente variabile tra il 53,42% e il 90,41%, garantendo quindi un soddisfacimento medio o notevole della richiesta idrica dell'utenza; i precedenti valori diventeranno rispettivamente più elevati oppure più contenuti considerando invece anni più piovosi o più siccitosi dell'anno 2015, che è stato preso come riferimento per l'analisi.
Efficienze (R_c) contenute, variabili generalmente tra il 50% e il 60%, possono essere generalmente raggiunte impiegando un'ampia gamma di cisterne $(V \ge 4m^3)$ e di coperture $(A \ge 70 - 90m^2)$.
Per conseguire un rendimento (R_c) pari invece al 70% occorre utilizzare serbatoi con capacità contenuta $(V \ge 4m^3)$ abbinati a coperture di estensione intermedia $(A \ge 130m^2)$; un'altra procedura tale da garantire la stessa efficienza consiste invece nell'installazione di cisterne più capienti $(V \ge 7{,}8m^3)$ in combinazione a coperture di medio-piccole dimensioni $(A \ge 90m^2)$.
Valori di affidabilità ancora superiori $(R_c \ge 80\%)$ necessitano di condizioni ancora più estreme; in particolare, è richiesta una delle seguenti due condizioni progettuali:

- $V = 6m^3,\ A = 118m^2$;
- $V = 10m^3,\ A = 100m^2$.

$R_c = 90\%$ richiede invece condizioni pressoché proibitive e pertanto difficilmente conseguibili sul territorio in cui è prevista l'installazione dei sistemi per la raccolta delle acque piovane.

Si osserva in conclusione che, considerando la villa bifamiliare introdotta come secondo caso studio all'interno del capitolo 6, $(A = 118m^2,\ V = 7{,}8m^3)$, il rendimento del sistema RWH è pari a $R_c = 84{,}93\%$. Il precedente risultato è notevolmente maggiore di quello ottenuto al paragrafo 8.1 e indica quindi un alto livello di soddisfacimento della domanda idrica per l'utilizzo del WC: il sistema garantisce infatti l'intera richiesta d'acqua per ben 310 giorni di un anno con regime pluviometrico medio.

8.3 Confronto dei risultati ottenuti dall'applicazione delle tre metodologie

Il presente paragrafo è incentrato sull'esecuzione di un confronto finale tra i risultati ottenuti nei capitoli 6, 7 e 8, applicando rispettivamente:

- la specifica tecnica italiana UNI/TS 11445:2012;
- il modello di bilancio idrico proposto da Pelak e Porporato;
- il modello di bilancio idrico proposto da Tsihrintzis-Baltas, Londra et al.,

per due tipologie totalmente differenti di edifici residenziali, vale a dire:

- un condominio su tre piani con 18 unità abitative e 37 residenti;
- una villa bifamiliare su due piani con 5 residenti.

Il primo confronto è relativo alla valutazione delle analogie esistenti, in termini di riduzione della domanda idrica dalla rete acquedottistica municipale, tra la normativa italiana e il modello di bilancio idrico elaborato da Tsihrintzis et al. La norma UNI/TS 11445:2012 ha fornito i due seguenti valori dell'Efficienza Idrica W_s dei sistemi RWH:

- Condominio: $W_s = 67{,}41\%$;
- Villa: $W_s = 89{,}27\%$.

I precedenti risultati possono essere comparati direttamente con quelli ottenuti dall'applicazione del modello di bilancio idrico a scala di serbatoio proposto da Tsihrintzis et al.; in quest'ultimo caso, l'efficienza di un sistema di raccolta delle acque meteoriche è espressa dal coefficiente di affidabilità R_c e presenta, per i due edifici residenziali, i seguenti valori:

- Condominio: $R_c = 56{,}99\%$;
- Villa: $R_c = 84{,}93\%$.

Questi risultati sono inferiori rispettivamente del 10% e del 4% circa rispetto ai precedenti e risulterebbero quindi apparentemente non confrontabili. Occorre però sottolineare che l'indice di affidabilità R_c del sistema RainWater Harvesting di approvvigionamento idrico alternativo è espresso dalla seguente relazione:

$$R_c = \frac{\sum\left(giorni\ \ senza\ \ utilizzo\ \ di\ \ acqua\ \ della\ \ rete\ \ acquedottistica\right)}{\sum\left(numero\ \ di\ \ giorni\ \ della\ \ serie\ \ temporale\ \ considerata\right)}, \tag{8.4}$$

ossia dal rapporto adimensionale tra il numero di giorni in cui il serbatoio di raccolta delle acque piovane è in grado di soddisfare completamente la domanda idrica per l'utilizzo del WC e il numero totale dei giorni presi come riferimento; questa definizione esclude quindi automaticamente i giorni in cui la domanda idrica è garantita solo in parte dal sistema RWH.
Se la precedente formula prendesse anche in considerazione i giorni di approvvigionamento idrico parziale dal serbatoio, l'indice di affidabilità R_c assumerebbe valori maggiori e pertanto del tutto simili a quelli ottenuti dall'applicazione della norma italiana UNI/TS 11445:2012: risulta quindi evidente che le due metodologie di valutazione dell'efficienza di un sistema RWH, pur considerando diverse scale temporali (rispettivamente mensile e giornaliera), sono entrambe affidabili per esprimere il rendimento di un sistema RWH.

Il secondo confronto tratta invece le due modalità alternative per la definizione dell'efficienza di un sistema RWH in termini di riduzione degli sfiori, ossia dei volumi di acqua defluenti per troppopieno verso la rete fognaria. La prima metodologia di valutazione è stata proposta all'interno del capitolo 6 relativamente alla specifica tecnica UNI/TS 11445:2012; quest'ultima definisce infatti, a partire dal cosiddetto overflow, ossia dalla porzione di acqua raccolta dal tetto che viene convogliata nella fognatura, l'indice di riduzione dello sfioro sulla base della seguente equazione:

$$Indice\ \ riduzione\ \ sfioro = 100 - O_F = 100 - \left(\frac{Afflusso\ \ annuo - Volume\ \ recuperato}{Afflusso\ \ annuo} \right) \cdot 100 . \quad (8.9)$$

I valori ottenuti per i due edifici residenziali sono pari a:

- Condominio: Indice di riduzione dello sfioro=100%;
- Villa: Indice di riduzione dello sfioro=82,60%,

e definiscono rispettivamente l'annullamento totale e la diminuzione considerevole della frazione di acque piovane che non sono impiegate dall'utenza e che fuoriescono pertanto dal sistema.

I precedenti valori devono essere confrontati con quelli ottenuti invece dall'applicazione del modello di bilancio idrico a scala di serbatoio, proposto nel 2016 da Pelak e Porporato: sulla base delle indicazioni fornite dai due autori del modello, i valori di efficienza ottenuti sono i seguenti:

$$\frac{\langle H \rangle}{\phi \cdot A \cdot \langle R \rangle} = D_c \cdot (1 - p_0) = \begin{cases} CONDOMINIO: 0{,}9710; \\ VILLA: 0{,}8394. \end{cases}$$

I due precedenti valori definiscono rispettivamente una riduzione pari a circa il 97% e l'84% rispetto alla condizione preesistente di assenza dei sistemi RWH e quindi di sola fornitura idrica dalla rete acquedottistica pubblica: questi risultati differiscono in maniera pressoché trascurabile rispetto a quelli ottenuti dall'applicazione della norma italiana e indicano di conseguenza, seppur con piccoli scarti, la validità di entrambe le metodologie.

Conclusioni e sviluppi futuri

La presente tesi si è focalizzata sulla valutazione analitica del bilancio idrico su una scala spaziale ridotta, ossia quella di un edificio residenziale: tale argomento sta progressivamente acquisendo rilievo, in quanto funge da punto di partenza per definire metodi innovativi di minimizzazione della domanda idrica domestica e urbana. La scelta di questo tema è motivata dal continuo aumento della richiesta idrica e dalla contestuale diminuzione della risorsa sfruttabile.

Dopo un iniziale excursus sulla disponibilità pro capite a scala globale, continentale, nazionale e regionale, nonché sui principali fattori, antropici e naturali, che stanno contribuendo a ridurre progressivamente il volume di acqua dolce accessibile, si è rivolta l'attenzione sul calcolo dei volumi in ingresso e in uscita dall'edificio, riportando i principali studi che consentono di far luce su questo argomento.
La prima analisi prende in considerazione la tipologia di impianto idraulico più evoluta, in quanto contempla non solo la raccolta delle acque piovane ma anche il recupero e il successivo trattamento delle acque reflue: occorre però tenere presente che tale applicazione, particolarmente elaborata, è per ora attuabile solo in ambito sperimentale, a causa dei costi di installazione ancora elevati che l'utenza deve affrontare.
Il secondo caso studio analizza invece un bilancio idrico alternativo per la scala di edificio, in quanto valuta la sola installazione di un sistema Rainwater Harvesting per la raccolta delle acque meteoriche: tale soluzione è, a differenza della precedente, economicamente praticabile, tant'è che costituisce l'alternativa di approvvigionamento idrico più attuata, pur rimanendo ancora confinata ai Paesi più evoluti del globo. Questo studio, pur descrivendo uno schema idraulico meno elaborato del precedente, è però corredato da valutazioni particolareggiate relative sia alla fattibilità economica che al rendimento del sistema ed può pertanto fungere da riferimento per la valutazione dell'efficienza di sistemi RWH installati in realtà che differiscono tra loro sotto l'aspetto pluviometrico.
Anche il terzo modello prevede l'installazione di un sistema RWH, ma risulta in alcune sezioni più particolareggiato del precedente, sia perché prevede una ripartizione tra acque di dilavamento e di seconda pioggia sia perché introduce una formulazione alternativa della domanda idrica. Tale modello consente di determinare, noti l'area della copertura e il volume della cisterna, l'efficienza del sistema, o in alternativa di individuare la capacità del serbatoio più idonea per conseguire un prefissato rendimento.

Dopo aver esaminato i tre modelli di bilancio idrico, è stato dato ampio spazio alla trattazione della specifica tecnica UNI/TS 11445:2012, la quale costituisce la normativa di riferimento in Italia per la progettazione, l'installazione e la manutenzione di sistemi per lo stoccaggio delle acque meteoriche;

tali sistemi sono in grado di raccogliere le acque piovane dalla copertura di un edificio, per impiegarle successivamente per gli utilizzi non potabili.

Nonostante l'approvvigionamento idrico attuale degli edifici residenziali sia garantito quasi esclusivamente dalla rete acquedottistica municipale, le stime attuali prevedono che, entro pochi decenni, la crisi idrica determinerà una condizione di totale emergenza, tale cioè da rendere necessaria l'installazione di sistemi di approvvigionamento idrico alternativi; la loro introduzione garantirà infatti non solo vantaggi tecnologici, con la parziale autosufficienza degli edifici che ne sono dotati, ma anche benefici ambientali, che si esplicano nella minimizzazione dei volumi idrici immessi nella rete acquedottistica. Tuttavia, finché l'opinione pubblica mondiale non sarà supportata economicamente da incentivi tali da agevolare la diffusione dei sistemi alternativi di approvvigionamento idrico, la loro installazione sarà a totale carico dell'utenza: si è quindi reso necessario valutare la possibile fattibilità economica degli stessi, ipotizzando l'installazione di sistemi per la raccolta e l'utilizzo delle acque meteoriche in due edifici residenziali di dimensioni differenti, collocati entrambi sul territorio italiano.
A questo scopo è stata eseguita un'analisi a tutto campo, che considera come punto di partenza il monitoraggio e l'analisi della domanda idrica di due edifici residenziali: ciò ha permesso di ricavare i dati necessari per eseguire il dimensionamento di due cisterne di raccolta, effettuato secondo le indicazioni fornite dalla normativa italiana UNI/TS 11445:2012. Poiché tuttavia i volumi così determinati non corrispondono a nessun serbatoio disponibile in commercio, è necessario individuare quelli caratterizzati dalla capacità immediatamente superiore.
Il successivo bilancio idrico annuo, su scala mensile, dei sistemi RWH ha poi permesso di determinare la loro Classe di Efficienza Idrica, in termini di volume annuo risparmiato, e l'Indice di riduzione dello sfioro, relativo alla minimizzazione del volume defluente nella rete fognaria. Sono stati poi determinati, assumendo come intervallo temporale di riferimento l'intera vita utile della cisterna, i costi totali per garantire l'approvvigionamento idrico da sistemi a doppio impianto; questi sono stati infine confrontati con quelli sostenuti per la sola fornitura dal Servizio Idrico Integrato, allo scopo di determinare la soluzione economicamente più vantaggiosa.

I risultati ottenuti hanno dimostrato la fattibilità tecnico-economica per l'installazione di entrambi i sistemi di approvvigionamento idrico alternativo, in quanto i costi totali sostenuti dall'utenza durante l'intera vita utile degli impianti risultano essere minori di quelli relativi ad una fornitura idrica tradizionale. Occorre poi ricordare tutte le ipotesi di base sotto cui è stata condotta l'analisi: a causa della presenza, per entrambi gli edifici residenziali, di un unico contatore, non è stato possibile determinare i reali consumi idrici giornalieri di ogni unità abitativa, nonché la domanda idrica soddisfatta teoricamente dalla cisterna, per cui quest'ultima è stata valutata in maniera semplificata sulla base delle indicazioni della specifica tecnica italiana.
Si è inoltre ipotizzato un valore costante dei consumi idrici per tutta la durata dell'analisi, sebbene il numero di residenti, che influenza maggiormente la domanda, subisca delle variazioni a intervalli irregolari. Allo stesso tempo, l'analisi economica costituisce un'evoluzione di quelle reperibili nei

precedenti studi, in quanto il tariffario idrico non è più ipotizzato costante nel tempo bensì variabile su scala annuale: questo ha consentito di ottenere risultati particolarmente veritieri, in quanto a partire dagli ultimi anni il tariffario idrico dell'acqua di rete è oggetto di incrementi sempre più significativi.

Per valutare l'affidabilità dei risultati ottenuti con l'applicazione della normativa italiana UNI/TS 11445:2012, si è poi scelto di applicare in maniera rigorosa i modelli di bilancio idrico proposti rispettivamente da Pelak e Porporato (2016) e da Tsihrintzis et al. (2013-2017), facendo riferimento agli stessi due edifici residenziali precedentemente presi in esame. I valori ricavati, relativi all'efficienza che un sistema RWH di raccolta delle acque meteoriche presenta nella minimizzazione della domanda idrica domestica e nella riduzione degli sfiori defluenti verso la rete fognaria, hanno fornito risultati estremamente simili, dimostrando quindi la validità di tutte e tre le metodologie di valutazione.

Una possibile applicazione futura potrebbe consistere nell'individuazione di un metodo univoco di dimensionamento dei serbatoi per lo stoccaggio delle acque meteoriche, tale cioè da garantire sia la minimizzazione dei costi totali che la massimizzazione dell'efficienza del sistema. Inoltre, per rendere gli edifici ancora più autosufficienti in termini di efficienza idrica, occorrerà valutare anche la fattibilità tecnico-economica dei sistemi per il riciclaggio delle acque reflue prodotte dall'utenza: questa metodologia, che attualmente è considerata solo a livello sperimentale, risulterà fondamentale in futuro per ottimizzare l'efficienza degli edifici, non solo in termini di riduzione dei prelievi dall'acquedotto ma anche di abbattimento dei volumi sfiorati all'interno della rete fognaria.

L'acqua si sta gradualmente trasformando in un bene sempre più raro, pertanto il "bilancio idrico a scala di edificio" costituirà un tema sempre più attuale: il contenimento dei consumi idrici di un edificio costituisce un problema complesso, associato ad un insieme di fattori di diversa natura, quali lo sviluppo demografico, il miglioramento della qualità della vita, la sostenibilità economica e il rispetto dell'ambiente. Occorre quindi intervenire in tempi brevi per sensibilizzare l'opinione pubblica affinché "l'elemento acqua" sia gradualmente collocato al centro dello sviluppo urbanistico, attraverso la diffusione di nuove modalità gestionali tali da garantire il parziale autosostentamento idrico degli edifici residenziali.

Bibliografia

Agudelo-Vera C.M., Mels A., Keesman K., Rijnaarts H., 2012. *The Urban Harvest Approach as an Aid for Sustainable Urban Resource Planning. Journal of Industrial Ecology, 16 (6), p. 839-850.*

Agudelo-Vera C.M., Keesman K., Mels A., Rijnaarts H., 2013. *Evaluating the Potential of Improving Residential Water Balance at Building Scale. Water Research, v. 47, p. 7287-7299.*

Allen George H., Pavelsky Tamlin M., 2018. *Global extent of rivers and streams.*

Böse K.H., 2012. *Recuperare l'acqua piovana per la casa e il giardino. Terra Nuova Edizioni.*

Campisano A., Modica C., 2011. *Regional Evaluation of the Performance of Rooftop Rain Water Harvesting Systems for Domestic Use. Proceedings of 12nd International Conference of Urban Drainage, Porto Alegre.*

Campisano A., Cutore P., Modica C., Nie L., 2013. *Reducing inflow to stormwater sewers by the use of domestic rainwater harvesting tanks. Proceeding 8th International Conference, Planning & technologies for sustainable urban water management, Ed. Novatech, Lyon.*

Codice Civile Art. 1123, comma 1 e comma 2.

Daly E., Porporato A., 2006. *Impact of hydroclimatic fluctuations on the soil water balance. Water Resources Research, 42 (6).*

Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 4 marzo 1996, all.9.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2012. *Norma UNI/TS 11445: Impianti per la raccolta e utilizzo dell'acqua piovana per usi diversi dal consumo umano - progettazione, installazione e manutenzione. Ed. UNI Italia, Milano.*

Fanizzi L., Misceo S., 2008. *Gli impianti urbani per lo sfruttamento dell'acqua meteorica di dilavamento. Rivista - L'Ambiente, n. 1, Ed. Ranieri, Milano*.

Fanizzi L., 2011. *Norme per l'abitare sostenibile. L'ambiente, n. 3, Ed. Icsa, Milano.*

Farreny R., Morales-Pinzón T., Guisasola A., Taya C., Rieradevall J., Gabarrell X., 2011. *Roof selection for rainwater harvesting: quantity and quality assessments in Spain. Water Research 45 (10).*

Fewkes A., 2000. *Modelling the Performance of Rainwater Collection Systems: towards a Generalized Approach. Urban Water, 1 (4), p. 323-333.*

Fewkes A., Butler D., 2000. *Simulating the Performance of Rainwater Collection and Reuse Systems Using Behavioral Models. Building Service Engineering, 21 (2), p. 99-106.*

Foekema H., van Thiel L., 2011. *Watergebruik Thuis 2010. VEWIN, Amsterdam.*

Gazzetta Ufficiale del 14 marzo 1996, n. 62, S.O.

Gikas G.D., Tsihrintzis V.A., 2012. *Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. Journal of Hydrology, 466, p. 115-126.*

Gikas G.D., Tsihrintzis V.A., 2017. *Effect of first-flush device, roofing material and antecedent dry days on water quality of harvested rainwater. Environmental Science and Pollution Research, 24 (27), p. 21997-22006.*

Gusmaroli G., Conte G., Brunelli G., 2015. *Modelli e strumenti di gestione e conservazione delle risorse idriche: sistemi naturali di ritenzione idrica, ricarica artificiale delle falde e processi partecipativi.*

Hoekstra A., 2013. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. London, UK, 27 (11), p. 3847-3848.*

Koumoura K.A., Feloni E.G., Londra P.A., Baltas E.A., Tsihrintzis V.A., 2018. *Uncertainty analysis in sizing rainwater harvesting tanks in an isolated island with limited water resources. Global Nest Journal, 20 (3), p. 534-540.*

Liaw C., Tsai Y., 2004. *Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use. Journal of the American Water Resources Association, Ed. J. Wiley & Sons, Middleburg, 40 (4), p. 901-912.*

Logan J.D., 2013. *Applied Mathematics. John Wiley & Sons.*

Londra P.A., Theoharis A.T., Baltas E., Tsihrintzis V.A., 2015. *Optimal sizing of rainwater harvesting tanks for domestic use in Greece. Water Resources Management, 29, p. 4357-4377.*

Milly P., 1993. *An analytic solution of the stochastic storage problem applicable to soil water. Water Resources Research, 29 (11), p. 3755-3758.*

Palla A., Gnecco I., Lanza G., 2011. *Non dimensional design parameters and performance assessment of rainwater harvesting systems. Journal Hydrology, Ed. Elsevier, Philadelphia.*

Pelak N., Porporato A., 2016. *Sizing a Rainwater Harvesting Cistern by Minimizing Costs. Journal of Hydrology 541, p. 1340-1347.*

Porporato A., Daly E., Rodriguez-Iturbe I., 2004. *Soil water balance and ecosystem response to climate change. The American Naturalist, 164 (5), p. 625-632.*

Tsihrintzis V.A., Baltas E., 2013. *Sizing of rainwater harvesting tank for in-house water supply. 13th International Conference on Environmental Science and Technology, Athens, Greece, 5-7 September 2013.*

Tsihrintzis V.A., Baltas E., 2014. *Determination of rainwater harvesting tank size. Global NEST Journal, 16 (5), p. 822-831.*

Yaziz M.I., Gunting H., Sapari N., Ghazali A.W., 1989. *Variations in rainwater quality from roof catchments. Water Research, 23 (6), p. 761-765.*

Sitografia

ec.europa.eu/eurostat

smarthome.duke.edu

www.altalex.com

www.arpa.piemonte.it

www.comitatoscientifico.org

www.durhamnc.gov

www.ecoacque.it

www.eea.europa.eu

www.fao.org

www.gazzettaufficiale.it

www.giorni-lavorativi.com

www.home-water-works.org

www.irsa.cnr.it

www.istat.it

www.kwrwater.nl

www.maddalena.it

www.met.wau.nl

www.minambiente.it

www.mondoacqua.com

www.ocse.org

www.pnas.org

www.rainharvest.com

www.resourcepanel.org

www.rototec.it

www.un.org

www.undesa.it

www.undp.org

www.uni.com

www.unwater.org

www.usgs.gov

www.who.int

www.worldbank.org

www.wri.org