



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali

Corso di laurea magistrale in Scienze forestali e ambientali

*Comportamento idrologico di sistemi di tetto
verde con e senza vegetazione*

Relatore

Prof.ssa Lucia Bortolini

Correlatore

Dott. Francesco Bettella

Laureanda:

Francesca Masiero

Matricola n.:

1109449

ANNO ACCADEMICO 2017 – 2018

INDICE

RIASSUNTO	13
ABSTRACT	15
1. INTRODUZIONE.....	17
1.1 I BENEFICI	19
1.2 TIPOLOGIE E COMPOSIZIONE	28
1.3 NORMATIVA.....	30
2. OBIETTIVI	33
3. MATERIALI E METODI.....	35
3.1 INQUADRAMENTO DELLO STUDIO.....	35
3.2 MICROCOSMI	36
3.2.1 <i>Generale</i>	36
3.2.1 <i>Stratigrafia</i>	38
3.2.2 <i>Vegetazione</i>	41
3.3 SIMULATORE DI PIOGGIA	49
3.4 RACCOLTA ED ELABORAZIONE DEI DATI	51
3.4.1 <i>Taratura e distribuzione di pioggia del simulatore</i>	51
3.4.2 <i>Simulazione di pioggia</i>	53
Calcolo della pioggia accumulata e deflusso	54
Calcolo del Curve Number.....	57
3.4.3 <i>Vegetazione</i>	59
Capacità di ritenzione idrica	60
4. RISULTATI E DISCUSSIONE	63
4.1 ANALISI DEI DATI RACCOLTI	63
4.1.1 <i>Simulatore di pioggia</i>	63
4.1.2 <i>Comportamento idrologico dei microcosmi</i>	67
Grafici di pioggia accumulata e drenata.....	67
Grafici di intensità di pioggia e velocità di deflusso	75
Capacità di ritenzione idrica	84
Calcolo del Curve Number.....	95
Percentuali di copertura.....	99
4.2 CONFRONTO CON I DATI DI LABORATORIO SENZA VEGETAZIONE	101
4.2.1 <i>Capacità di ritenzione idrica e acqua accumulata per sistemi con e senza vegetazione</i> ...	102
4.2.2 <i>Curve Number</i>	108
4.3 CONFRONTO CON DATI DI LETTERATURA	111
4.3.1 <i>Comportamento idrologico e tipologia di vegetazione</i>	111
4.3.2 <i>Curve Number</i>	116
6. CONCLUSIONI	121
BIBLIOGRAFIA.....	123

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Foto di tetto verde (Wikimedia commons).....	17
Figura 2: Schema dei benefici forniti dai SuDS (susDrain 2012)	18
Figura 3: Sintesi dei benefici di un tetto verde (Fioretti et al. 2010)	20
Figura 4: Esempio di smaltimento della precipitazione in un ambiente densamente urbanizzato e in uno naturaliforme (U.S. Environmental Protection Agency 2008)	21
Figura 5: Deflusso annuale da diverse tipologie di copertura, rispettivamente intensive (int), estensive (ext), di ghiaia (gravel) e tradizionali (trad) (Mentens et al. 2006)	21
Figura 6: Comportamento idrologico di un tetto verde (Stovin et al. 2015)	22
Figura 7: Grafico di temperatura di un tetto verde e di una copertura tradizionale (Fioretti et al. 2010)	24
Figura 8: Spessori di substrato in funzione della prestazione termodinamica attesa (ISPRA 2012).....	25
Figura 9: Variazioni di temperatura atmosferica e superficiale (U.S. Environmental Protection Agency 2008)	26
Figura 10: Differenza di temperatura tra un tetto verde ed uno convenzionale (U.S. Environmental Protection Agency 2008).....	26
Figura 11: Esempio di stratigrafia di biotopo pensile ideato da Bauder (Bauder S.r.l. 2015).....	28
Figura 12: Proprietà più comuni delle varie tipologie di tetto verde (SPRA 2012)	29
Figura 13: Spessori minimi di substrato in funzione della vegetazione da impiegare, UNI 11235:2007 (Ispra, 2012)	31
Figura 14: Inquadramento del sito di studio, in giallo sulla mappa il comune di Legnaro	35
Figura 15: Cassetta posta in sede sulla bilancia, ben visibile il tubo di scarico raccordato alla cassetta	37
Figura 16: Microcosmo con Sedum (miscuglio A)	38
Figura 17: Microcosmo con specie erbacee (miscuglio B)	38
Figura 18: Microcosmo con specie suffruticose (miscuglio C)	38
Figura 19: <i>Sedum reflexum L.</i>	43
Figura 20: <i>Sedum acre L.</i> in mezzo ai fusti striscianti di <i>Sedum album L.</i>	43
Figura 21: <i>Sedum sexangulare L.</i>	44
Figura 22: <i>Euphorbia cyparissias L.</i>	45
Figura 23: <i>Bromus erectus H.</i>	45
Figura 24: <i>Potentilla pulsilla Hort.</i>	46
Figura 25: <i>Artemisia alba L.</i>	47
Figura 26: <i>Clinopodium nepeta L.</i>	47

Figura 27: <i>Dianthus carthusianorum</i> L.	48
Figura 28: <i>Dianthus sylvastris</i> W.	48
Figura 29: <i>Thymus serpyllum</i> L.	48
Figura 30: Simulatore di pioggia, setup tipico di una prova	49
Figura 31: Pompa utilizzata per portare in pressione l'acqua	49
Figura 32: Dettaglio della struttura di sostegno e dei tubi collettori e capillari del simulatore di pioggia	50
Figura 33: Dettaglio del posizionamento a griglia dei tubi capillari nel pannello della struttura	50
Figura 34: Dettaglio del tubo collettore e dell'innesto con la presa d'acqua proveniente dalla pompa	50
Figura 35: Dettaglio dello scarico che convoglia l'acqua drenata nel contenitore per la pesata.....	50
Figura 36: Manometro raccordato alla pompa per regolare con precisione la pressione in uscita	51
Figura 37: Distribuzione delle caraffe all'interno della cassetta	52
Figura 38: Immersione della cassetta in acqua per 12h.....	54
Figura 39: : Pioggia accumulata nel microcosmo (S) e pioggia drenata dallo stesso (D) in funzione del tempo per una prova con tempo di ritorno di 30 anni	56
Figura 40: Intensità di pioggia (J) e velocità di deflusso (ρ) in funzione del tempo per una prova con tempo di ritorno di 30 anni	57
Figura 41: Esempio di elaborazione grafica di una foto di copertura in questo caso di un microcosmo ad erbacee perenni.....	59
Figura 42: Esempio di elaborazione delle foto per ricavare le percentuali di copertura	60
Figura 43: Taratura del simulatore per il tempo di ritorno di 2 anni	64
Figura 44: Taratura del simulatore per il tempo di ritorno di 30 anni	64
Figura 45: Distribuzione della pioggia per la simulazione con tempo di ritorno di 2 anni.....	66
Figura 46: Distribuzione della pioggia per la simulazione con tempo di ritorno di 2 anni.....	66
Figura 47: Legenda per distinguere i miscugli di vegetazione nei grafici di pioggia accumulata e drenata	67
Figura 48: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 2 anni per sistema con Vulcanico e Perlite e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 34, 3, 6	68
Figura 49: : Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 30 anni per sistema con Vulcanico e Perlite e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 34, 3, 6	68
Figura 50: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 2 anni per sistema con Vulcanico e Profilo termoformato e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 11, 12, 32	69
Figura 51: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 30 anni per sistema con Vulcanico e Profilo termoformato e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 11, 12, 32	70

Figura 52: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 2 anni per sistema con Laterizio e Perlite e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 13, 9, 7.....	71
Figura 53: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 30 anni per sistema con Laterizio e Perlite e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 13, 9, 7.....	71
Figura 54: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 2 anni per sistema con Laterizio e Profilo termoformato e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 8, 19, 35	72
Figura 55: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 30 anni per sistema con Laterizio e Profilo termoformato e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 8, 19, 35	73
Figura 56: Pioggia accumulata e drenata per tre campioni con ZN-PI e diversi miscugli di vegetazione, si nota l'andamento molto simile tra tutte le curve	74
Figura 57: Pioggia accumulata e drenata per tre campioni con ZN-BA e diversi miscugli di vegetazione, si nota l'andamento abbastanza diverso tra le curve	74
Figura 58: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 2 anni per sistemi Vulcanico e Perlite, campioni 34, 3, 6	76
Figura 59: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 30 anni per sistemi Vulcanico e Perlite, campioni 34, 3, 6.....	77
Figura 60: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 2 anni per sistemi Laterizio e Perlite, campioni 13, 9, 7	78
Figura 61: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 30 anni per sistemi Laterizio e Perlite, campioni 13, 9, 7.....	79
Figura 62: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 2 anni per sistemi Vulcanico e Profilo termoformato, campioni 11, 12, 32.....	80
Figura 63: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 30 anni per sistemi Vulcanico e Profilo termoformato, campioni 11, 12, 32	81
Figura 64: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 2 anni per sistemi Laterizio e Profilo termoformato, campioni 8, 19, 35.....	82
Figura 65: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 30 anni per sistemi Laterizio e Profilo termoformato, campioni 8, 19, 35	83
Figura 66: Valori di WRC_1 in mm per i diversi microcosmi.....	88
Figura 67: Valori di WRC_2 in mm per i diversi microcosmi.....	88
Figura 68: Profilo termoformato (Bauder S.r.l. 2015).....	89
Figura 69: Tessuto di protezione in fibra di poliestere e polipropilene	89
Figura 70: Valori di pioggia accumulata della simulazione (acqua gravitazionale) in percentuale per il tempo di ritorno di 2 anni per i diversi microcosmi.....	90

Figura 71: Valori di pioggia accumulata della simulazione (acqua gravitazionale) in percentuale per il tempo di ritorno di 30 anni per i diversi microcosmi	91
Figura 72: Valori di capacità di ritenzione idrica in mm in funzione del tipo di vegetazione.....	92
Figura 73: Valori di capacità di ritenzione idrica in mm in funzione del tipo di substrato.....	92
Figura 74: Valori di capacità di ritenzione idrica in mm in funzione del tipo di strato di accumulo e drenaggio.....	93
Figura 75: Valori di pioggia trattenuta durante le simulazioni (acqua gravitazionale) in mm in funzione del tipo di vegetazione	93
Figura 76: Valori di pioggia trattenuta durante le simulazioni (acqua gravitazionale) in mm in funzione del tipo di substrato	94
Figura 77: Valori di pioggia trattenuta durante le simulazioni (acqua gravitazionale) in mm in funzione del tipo di drenante.....	94
Figura 78: Valori di I in mm per ciascun microcosmo.....	96
Figura 79: Valori di S in mm in relazione alle percentuali di copertura per ciascun microcosmo	97
Figura 80: Valori di curve number in funzione del tipo di vegetazione.....	97
Figura 81: Valori di curve number in funzione del tipo di substrato.....	98
Figura 82: Valori di curve number in funzione del tipo di strato di accumulo e drenaggio.....	98
Figura 83: Percentuali di copertura vegetale per ciascun microcosmo	100
Figura 84: Relazione tra capacità di ritenzione idrica e copertura vegetale	100
Figura 85: Relazione tra acqua gravitazionale e copertura vegetale	101
Figura 86: Relazione tra CN e copertura vegetale.....	101
Figura 87: Confronto tra WRC_1 dei sistemi con e senza vegetazione.....	103
Figura 88: Differenza tra capacità di ritenzione idrica dei sistemi con e senza vegetazione	104
Figura 89: Valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione per tempo di ritorno di 2 anni.....	105
Figura 90: Valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione per tempo di ritorno di 30 anni.....	106
Figura 91: Differenza tra valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione per tempo di ritorno di 2 anni.....	108
Figura 92: Differenza tra valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione per tempo di ritorno di 30 anni.....	108
Figura 93: Confronto tra valori di S con AMC(II) di sistemi con e senza vegetazione	110
Figura 94: Confronto tra valori di CN(II) per sistemi con e senza vegetazione	110
Figura 95: Rapporto tra il peso medio secco dell'apparato radicale e la quantità di deflusso per la simulazione con intensità più elevata (tratto da Dunnett et al. 2008)	113

Figura 96: Performance di ritenzione idrica per eventi con $P > 10$ mm (tratto da Stovin et al. 2015).	114
Figura 97: Valori di detention, qui viene considerato il picco di attenuazione del deflusso (tratto da Stovin et al. 2015)	115
Figura 98: Picco di attenuazione del deflusso per eventi con $P > 10$ mm. Il picco è basato su step di 5 minuti (tratto da Stovin et al. 2015).....	116
Figura 99: Strafigrafia del tetto verde estensivo monitorato da Carter e Rasmussen (2006) (tratto da Carter e Rasmussen 2006)	117
Figura 100: Esempificazione della configurazione del campione di tetto verde utilizzato da Alfredo et al. (2010) (tratto da Alfredo et al. 2010).....	119

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Descrizione delle combinazioni di microcosmi	37
Tabella 2: Caratteristiche tecniche dei substrati utilizzati (Europomice S.r.l. 2017; ZinCo Italia S.r.l. 2012).....	39
Tabella 3: Caratteristiche tecniche dello strato filtrante (Bauder S.r.l. 2015).....	39
Tabella 4: Caratteristiche tecniche degli strati di accumulo e drenaggio (Bauder S.r.l. 2010; Perlite Italiana S.r.l. 2010).....	40
Tabella 5: Caratteristiche tecniche degli strati protettivi (Bauder S.r.l. 2015; Perlite Italiana S.r.l. 2010)	41
Tabella 6: Elenco delle specie presenti per i diversi miscugli dei microcosmi	42
Tabella 7: Esempio di prima elaborazione dei dati	55
Tabella 8: Pressione di esercizio della pompa ottenuta dalla taratura del simulatore per i tempi di ritorno e la pioggia totale caduta in 10 minuti.....	63
Tabella 9: Coefficienti di uniformità di Christiansen C_u per le diverse prove e i rispettivi tempi di ritorno.....	65
Tabella 10: Valori massimi di pioggia accumulata per combinazioni VU-PI per i due tempi di ritorno	69
Tabella 11: Valori massimi di pioggia accumulata per combinazioni VU-BA per i due tempi di ritorno	70
Tabella 12: Valori massimi di pioggia accumulata per combinazioni ZN-PI per i due tempi di ritorno	72
Tabella 13: Valori massimi di pioggia accumulata per combinazioni ZN-BA per i due tempi di ritorno	73
Tabella 14: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 2 anni per combinazioni VU-PI.....	76
Tabella 15: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 30 anni per combinazioni VU-PI.....	77
Tabella 16: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 2 anni per combinazioni ZN-PI	78
Tabella 17: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 30 anni per combinazioni ZN-PI.....	79
Tabella 18: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 2 anni per combinazioni VU-BA	80
Tabella 19: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 30 anni per combinazioni VU-BA	81
Tabella 20: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 2 anni per combinazioni ZN-BA.....	82
Tabella 21: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 30 anni per combinazioni ZN-BA.....	83
Tabella 22: Pesi delle piante umide e secche prelevate da ogni microcosmo	84
Tabella 23: Pesi dei vari componenti dei microcosmi di tetto verde	85
Tabella 24: Pesi complessivi delle varie combinazioni di substrato e drenante	86
Tabella 25: Pesi dei campioni all'inizio della prova e pesi massimi raggiunti durante la prova.....	86
Tabella 26: Valori di WRC_1 e di WRC_2 per ogni microcosmo per i due tempi di ritorno e medi	87

Tabella 27: Massima quantità di acqua accumulata (acqua gravitazionale) della simulazione di pioggia, in mm e percentuale, dai microcosmi per i due tempi di ritorno	89
Tabella 28: Valori di I, S e CN ricavati per regressione non lineare con il metodo del CN-SCS e i relativi errori.....	95
Tabella 29: Percentuali di copertura della vegetazione dei microcosmi	99
Tabella 30: Valori di capacità di ritenzione idrica per sistemi con e senza vegetazione.....	102
Tabella 31: Valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione.....	104
Tabella 32: Percentuali di acqua accumulata (gravitazionale) dai sistemi senza vegetazione rispetto alla pioggia totale	106
Tabella 33: Differenza tra valori di acqua accumulata (gravitazionale), in mm e percentuale, per sistemi con e senza vegetazione per i due tempi di ritorno	107
Tabella 34: Valori di I, S e CN con relativi errori in condizioni di saturazione (AMCIII) e in condizioni idriche medie (AMCII) per i sistemi senza vegetazione	109
Tabella 35: Valori di S e CN con AMC(II) per sistemi con e senza vegetazione.....	109
Tabella 36: Elenco e caratteristiche delle specie utilizzate da Dunnett et al. (2008) nella seconda sperimentazione (tratto da Dunnett et al. 2008).....	112
Tabella 37: Caratteristiche del substrato utilizzato da Getter et al. (2007) (tratto da Getter et al. 2007)	118
Tabella 38: Valori di CN per diversi siti suddivisi secondo il clima (C=warm temperate; D=snow; f=fully humid; s=summer dry; a=hot summer; b=warm summer; c=cool summer).....	119
Tabella 39: Riassunto dei valori di CN e relativi valori di S riportati dagli studi di letteratura analizzati e media dei valori di CN per sistemi con stessa vegetazione	119

RIASSUNTO

I sistemi di verde pensile sono utilizzati per mitigare il problema della gestione delle acque meteoriche in ambiente urbano, riducendo l'impatto dell'impermeabilizzazione dovuta alla cementificazione del territorio.

In questo lavoro di tesi è stato studiato il comportamento idrologico di diverse configurazioni di microcosmi di verde pensile estensivo in risposta alla simulazione di eventi di pioggia intensi caratteristici della pianura padana veneta, con tempo di ritorno di 2 anni (1,68 mm/min) e 30 anni (3,02 mm/min), in condizioni di umidità antecedenti critiche.

I microcosmi sono costituiti da 12 cm di substrato (laterizio riciclato o vulcanico estensivo), uno strato di accumulo e drenaggio (perlite o profilo termoformato), uno strato protettivo e vegetazione. I tre miscugli di vegetazione sono composti da Sedum, erbacee perenni e suffruticose.

In principio si sono effettuate delle prove del simulatore di pioggia, per tarare lo strumento e verificare l'uniformità della distribuzione di pioggia simulata.

Quindi sono state fatte tre prove di simulazione per ogni tempo di ritorno per le 12 configurazioni di microcosmo. Per la vegetazione sono stati misurati le percentuali di copertura e il contenuto d'acqua.

I dati raccolti sono stati analizzati e sono stati creati dei grafici rappresentativi dell'acqua accumulata e deflusso, velocità di drenaggio e capacità di ritenzione idrica di ciascun microcosmo.

Tramite regressione sono stati ricavati anche i valori di Curve Number per ogni microcosmo, che hanno evidenziato valori medi pari a 88, 89 e 91 rispettivamente per i miscugli di Sedum, erbacee perenni e suffruticose.

Si è proceduto, quindi, ad effettuare dei confronti di tali risultati con i valori ottenuti da precedenti prove di laboratorio sui medesimi sistemi senza copertura vegetale, da cui si evince come la vegetazione influisca in modo positivo sulla gestione del deflusso, aumentando le capacità di ritenzione idrica; in particolare, la vegetazione a Sedum ha fatto rilevare le migliori prestazioni.

È stato notato, infine, come i valori trovati, in particolar modo quelli relativi al CN, sono all'interno del range di valori ricavati da altri studi di letteratura per il verde pensile estensivo.

ABSTRACT

Green roofs are promoted for the management of urban stormwater runoff, reducing runoff and the potential flooding caused by the increasing of impervious surfaces.

The purpose of this thesis is to analyze the hydrological response of 12 different combinations of extensive green roof microcosms under specific simulated rainfall intensity in critical soil moisture condition.

Green roof test beds are composed of 12 cm of two different growth media (volcanic extensive and recycled crushed brick-based), two different drainage/storage layers (HDPE preformed and expanded perlite), a protection layer and three different vegetation mixtures composed by Sedum, herbaceous perennial and suffruticose plants.

At first, a rainfall simulator was prepared in the laboratory of the agricultural mechanization facility of the Department TESAF and calibrated to verify the rainfall distribution uniformity. Canopy closures were measured by taking photos of the vegetation. Rainfall events with two different intensities were simulated and replicated three times for each tested microcosm. During and after each test the weight of each microcosm was continuously measured using two balances connected to a computer. The recorded data were analyzed and elaborated to obtain the accumulated and drained water, the drainage rate and the water retention capacity of each microcosm.

Using non-linear regression analysis, the obtained values of Curve Number were 88, 89 and 91 respectively for Sedum, perennial and suffruticose mixtures. These values are in accordance with the other values reported in literature for extensive green roofs.

Results showed that vegetation positively influences green roofs performance, increasing water retention capacity and reducing runoff, in particular with Sedum mixture.

1. INTRODUZIONE

Un tetto verde mantiene le caratteristiche tecnologiche e costruttive di una copertura tradizionale cercando in più di riprodurre le prestazioni tipiche di un suolo naturale ricoperto di vegetazione (Figura 1). Per questo motivo può essere considerato uno strumento di compensazione e mitigazione ambientale degli impatti della nuova urbanizzazione (ISPRA 2012). Terreni agricoli, prati e boschi sono sempre più sostituiti dalle superfici impermeabili di strade e costruzioni intensificando così il deflusso delle acque meteoriche, diminuendo la ricarica delle falde e aumentando la portata dei canali (Mentens et al. 2006).



Figura 1: Foto di tetto verde (Wikimedia commons)

I tetti verdi fanno parte dei sistemi di drenaggio sostenibili che vengono chiamati SuDS come possibile soluzione ai problemi di occupazione e impermeabilizzazione del suolo.

I SuDS, acronimo per Sustainable Drainage Systems, comprendono tutti quei sistemi che gestiscono il deflusso superficiale dell'acqua piovana cercando di integrare l'uso e la conservazione di sistemi naturali con sistemi ingegnerizzati. Le soluzioni sono molte e diversificate per poter essere adeguatamente distribuite in tutta l'area urbana e poter pianificare lo sviluppo del territorio: da sistemi di infiltrazione, come pavimentazioni drenanti, a rain garden e aree umide, fino ai tetti verdi (Palla et al. 2010; susDrain 2012).

Tutti questi sistemi mirano a regolare il deflusso dell'acqua, migliorarne la qualità ed aumentare la biodiversità dell'ambiente, tenendo anche conto del loro valore estetico. I SuDS si propongono dunque di fornire un quadrato di benefici in parti uguali, non solo di carattere quantitativo e qualitativo ma anche estetico, creando un ambiente migliore anche per le persone, ed ecologico con l'incremento della biodiversità (Figura 2)(susDrain 2012).

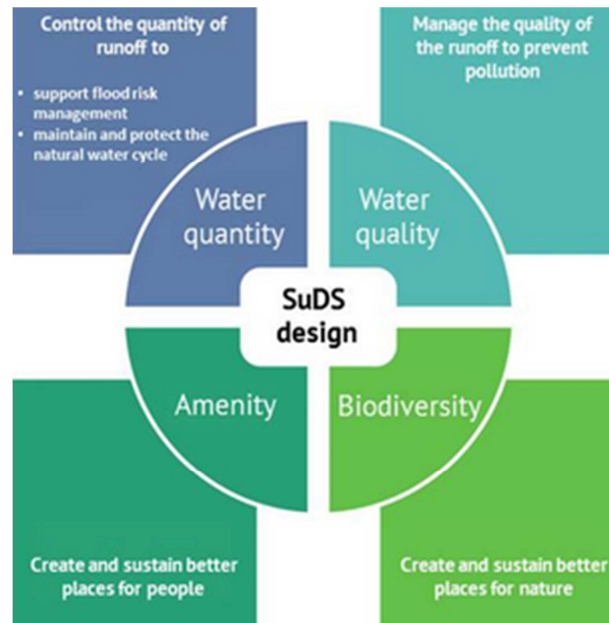


Figura 2: Schema dei benefici forniti dai SuDS (susDrain 2012)

L'utilizzo dei tetti verdi si è molto ampliato nell'ultimo decennio. In particolar modo in Germania questi sistemi sono molto diffusi e promossi dall'amministrazione pubblica come compensazione ambientale; un buono sviluppo si ha anche in Austria e in Svizzera, dove vi sono, come nel caso tedesco, incentivi pubblici per la loro realizzazione. Il motivo primario è di carattere ambientale: il tetto verde è considerato principalmente come habitat e spazio verde in sostituzione a quelli persi per lo sviluppo urbanistico.

In Inghilterra, per quanto la loro diffusione sia inferiore e limitata ad edifici nuovi e lussuosi, a centri ambientali o a case di amatori, la ricerca è invece ben sviluppata ed ha il suo fulcro nell'università di Sheffield che ha stabilito, in collaborazione con il consiglio della città, un 'Green Roof Forum' (Dunnett and Kingsbury 2008).

Nei paesi nordici, come la Scandinavia, la Svezia e la Norvegia ed in particolar modo in quest'ultima, i tetti verdi sono invece legati alla tradizione, in quanto in passato si usava ricoprire i tetti con zolle erbose con il principale scopo di isolare le case dal freddo e dall'umidità invernali (Bengtsson et al. 2005; Dunnett and Kingsbury 2008)

In Italia, come anche nel resto del Sud Europa, i tetti verdi sono molto meno diffusi, principalmente per via delle differenze climatiche notevoli che spesso non permettono l'utilizzo degli stessi sistemi ideati per il centro e nord Europa. Tuttavia il settore è in crescita anche grazie alla pubblicazione del codice di pratica UNI per la progettazione, esecuzione e manutenzione delle opere a verde pensile, delle linee guida dell'ISPRA (2012) e per l'interesse pubblico che inizia a manifestarsi che ha portato all'introduzione delle prime agevolazioni fiscali per la loro realizzazione (Abram 2006; Dunnett and Kingsbury 2008; ISPRA 2012; DPR n.59/2009 2009).

Per quanto riguarda il comportamento idrologico dei tetti verdi, la gestione delle acque meteoriche è il primo beneficio di immediata percezione a cui la ricerca si è indirizzata già da tempo (Abram 2006; Palla et al. 2010). Vari studi hanno cercato di capire come i diversi componenti di una copertura verde vadano a influenzare le performance idrologiche del sistema, studiando le relazioni tra precipitazione, caratteristiche del tetto verde e deflusso (Mentens et al. 2006) e analizzando quindi la capacità del sistema di accumulare l'acqua piovana e dilazionare e ridurre il picco di deflusso rispetto ad una copertura tradizionale.

Queste ricerche sono fatte in laboratorio o in campo, tenendo conto e analizzando i fattori influenti sulle performance, dalla tipologia e altezza del substrato, dall'effetto di sistemi drenati, dalla pendenza e dall'esposizione del sistema e dal tipo e dalla copertura vegetale (Stovin et al. 2015). In questa sede ci si concentrerà sugli studi di laboratorio in quanto simili al caso di studio di questa tesi. Innumerevoli sono le ricerche a livello internazionale che si riferiscono però principalmente ad installazioni in clima continentale o subartico (Palla et al. 2008). Mentre, in Europa, gli studi di laboratorio più interessanti sono stati effettuati in Inghilterra dall'Università di Sheffield che ha impostato una serie di studi eseguiti con un simulatore di pioggia appositamente realizzato, nei quali è stato analizzato il comportamento di differenti combinazioni di microcosmi e le relazioni tra i vari parametri (Vesuviano et al. 2013; Yio et al. 2013), oltre ad eseguire studi di campo sugli stessi (Dunnett et al. 2008; Stovin 2010; Stovin et al. 2012; Stovin et al. 2015)

Per quanto concerne le regioni mediterranee e specialmente l'Italia invece gli studi scientifici sono scarsi (Palla et al. 2008), tra i quali spiccano quelli dell'Università di Genova (Fioretti et al. 2010; Palla et al. 2010; Palla et al. 2011; Palla et al. 2012).

1.1 I benefici

La prima impressione che si ha pensando ad un tetto verde è che la sua principale funzione sia di carattere estetico, è piacevole alla vista e dona un senso di maggior quiete e benessere di uno spazio altrimenti ricoperto di guaine impermeabilizzanti, cementificato o tutt'al più di una distesa di ghiaia bianca.

Il primo impatto è dunque estetico e influisce sulla psiche dell'osservatore come potrebbe fare un altro tipo di area verde urbana, migliorando la percezione dell'ambiente e la qualità di vita, riducendo lo stress e aumentando le emozioni positive (Ulrich 1986).

Tuttavia non ci si può soffermare al solo beneficio estetico quando si parla di una copertura a verde. Infatti, essa genera una numerosa serie di altri fattori positivi di cui bisogna tenere conto, alcuni più studiati e maggiormente quantificabili, altri il cui studio risulta più complesso e non si è ancora giunti

ad una loro possibile quantificazione numerica (Abram 2006). In Figura 3 è riportata una possibile sintesi dei benefici proposta da Fioretti et al. (2010).

Benefits on the roof	Benefits on the building	Benefits at a larger scale
Thermal transmittance	Heat load	Heat island
Thermal inertia	Thermal comfort	Filtration of airborne particulates
Reduction solar absorbance	Acoustic comfort	Carbon dioxide–oxygen exchange
Reduction of noise	Energetic consumption	Reduce storm water
	Microclimate outdoor	

Figura 3: Sintesi dei benefici di un tetto verde (Fioretti et al. 2010)

Dato l'argomento della sperimentazione di questo lavoro di tesi viene trattato maggiormente il beneficio sulla regimazione idrica, ovvero il ruolo chiave che il verde pensile ha sulla gestione delle acque meteoriche in ambiente urbano.

Gli altri benefici, benché non meno importanti, sono solo brevemente citati.

Gli studi che generalmente sono più frequenti in letteratura riguardano proprio il comportamento idrologico della copertura a verde (Abram 2006). Chiaramente questo aspetto è anche uno dei più ricercati in quanto permette di capire in che misura si possa ridurre l'impatto dell'impermeabilizzazione dovuta alla cementificazione del territorio, utilizzando il tetto verde come misura di compensazione (Abram 2006; Giacomello 2012).

Con la creazione di nuovi spazi urbanizzati infatti si viene ad occupare suolo permeabile che, rispetto a una superficie impermeabile, riesce a smaltire più lentamente le acque meteoriche prima che giungano a un canale collettore.

Un terreno permeabile infatti permette alla precipitazione di infiltrarsi negli strati del terreno, diminuendo la percentuale di acqua che viene smaltita subito come deflusso superficiale, creando dei deflussi sottosuperficiali e profondi dilazionati nel tempo. Senza contare il quantitativo di acqua che viene intercettato da parte della vegetazione e quella immagazzinata nel terreno assorbita dalle piante e rimessa in circolo per evapotraspirazione.

Una superficie impermeabile invece velocizza notevolmente i tempi di corrivazione dell'acqua, andando a riempire il collettore molto più in fretta e rendendolo alle volte insufficiente a trasportare tutta l'acqua convogliata, causando così aumenti nei picchi di piena e maggiori rischi di esondazione dei canali nelle aree abitate (Giacomello 2012). In particolare durante piogge brevi, l'acqua che da una superficie impermeabile defluirebbe subito, viene trattenuta dal substrato e dalla vegetazione riducendo e spostando il picco di deflusso (Bengtsson et al. 2005).

Una buona esemplificazione di questo fenomeno è rappresentato in Figura 4.

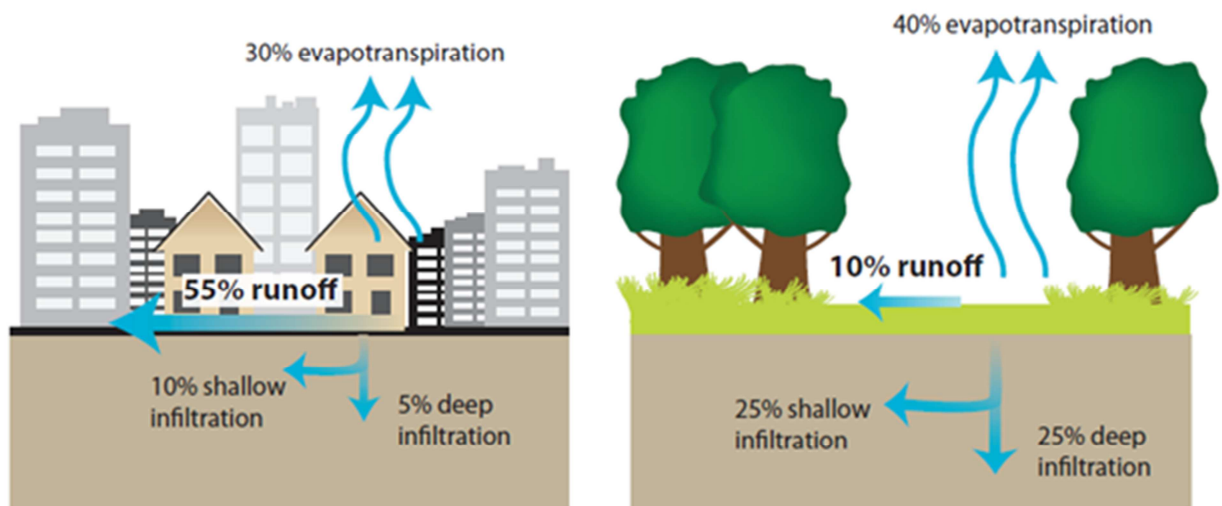


Figura 4: Esempio di smaltimento della precipitazione in un ambiente densamente urbanizzato e in uno naturaliforme (U.S. Environmental Protection Agency 2008)

Da dati di letteratura è evidente che un sistema di copertura a verde è in grado di ridurre in modo significativo il deflusso superficiale, con volume di ritenzione dell'ordine del 40-80% del volume di pioggia totale (Bengtsson et al. 2005; VanWoert et al. 2005; Palla et al. 2010; Monterusso, 2004). Mentenes et al. (2006) analizzando una serie di dati riporta la percentuale di deflusso annuale di diverse coperture (Figura 5), evidenziando come i tetti verdi, in particolar modo quelli intensivi, possano ridurre il deflusso di più del 50%, rispetto ad una copertura tradizionale.

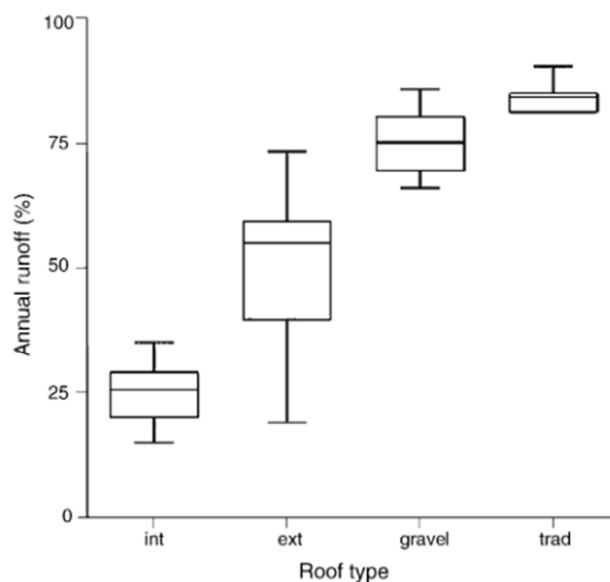


Figura 5: Deflusso annuale da diverse tipologie di copertura, rispettivamente intensive (int), estensive (ext), di ghiaia (gravel) e tradizionali (trad) (Mentens et al. 2006)

In particolare, per l'ambiente mediterraneo, una sperimentazione di Palla et al. (2010) su una copertura estensiva mostra come il volume d'acqua trattenuto e l'attenuazione del picco di deflusso

siano rispettivamente del 68% e dell'89%, su osservazioni basate su un intero anno idrologico (Fioretti et al. 2010; Palla et al. 2010).

Una copertura a verde influenza quindi il ciclo dell'acqua in ambiente urbano in una serie di modi consentendo una regolazione del deflusso. Di seguito si analizza in che modo le componenti di un tetto verde interagiscono con la precipitazione.

Il substrato e gli strati di accumulo e drenaggio permettono l'immagazzinamento di acqua e il dilazionamento nel tempo del deflusso, simulando un terreno naturale, per quanto di poca profondità e diversa permeabilità. Il sistema è chiaramente un sistema ingegneristico che cerca di ottimizzare la trattenuta d'acqua ma anche di creare un ambiente idoneo allo sviluppo delle piante che altrimenti, con caratteristiche di non buona permeabilità e quindi scarsa areazione, non potrebbero sopravvivere (Giacomello 2012).

Il substrato ha dunque la capacità nonché il compito di accumulare l'acqua e drenarla in un tempo più lungo rispetto ad una superficie impermeabile ma anche di renderla disponibile per le piante.

La vegetazione interviene per intercettazione ed evapotraspirazione della precipitazione e, inoltre, tramite l'assorbimento e lo stoccaggio di acqua nei propri tessuti, vedi in particolar modo le specie crassulacee come il Sedum (Dunnnett et al. 2008). Un interessante schema riassuntivo del comportamento di un tetto verde è riportato in Figura 6.

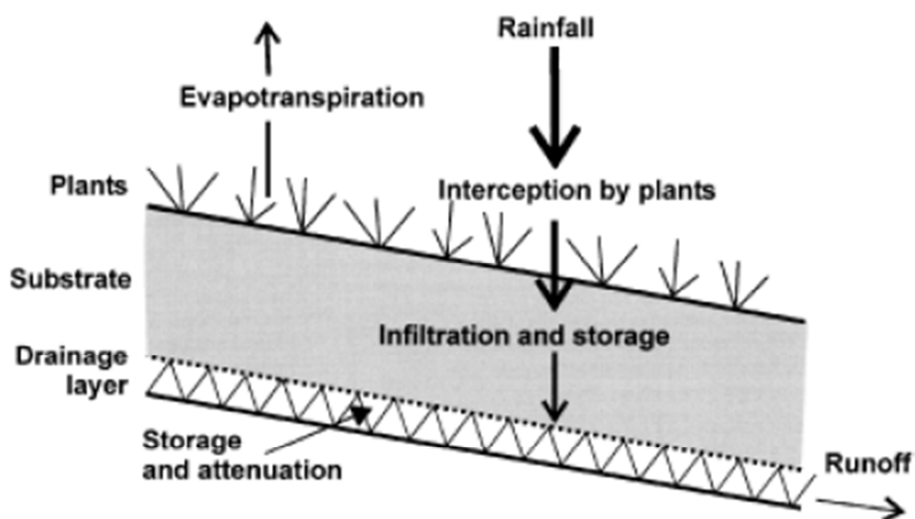


Figura 6: Comportamento idrologico di un tetto verde (Stovin et al. 2015)

Chiaramente la quantità d'acqua che può essere intercettata, stoccata e restituita al ciclo idrologico dipende da numerose caratteristiche del sistema. Queste sono (Crockford and Richardson 2000; Stovin et al. 2015):

- caratteristiche del substrato, come spessore e tipologia, quindi permeabilità e quantità di sostanza organica;

- caratteristiche della vegetazione, come struttura della chioma, densità ed architettura delle piante, presenza o meno di lettiera e capacità di stoccaggio di acqua nei tessuti della pianta;
- pendenza ed esposizione del sistema;
- caratteristiche della precipitazione e quindi condizioni climatiche, intensità dell'evento e tempo di pioggia;
- condizioni precedenti di umidità del sistema.

A parità di piovosità media annua le prestazioni del sistema, in termini di coefficienti di deflusso, tenderanno a diminuire con piogge intense e concentrate mentre saranno migliori con piogge con distribuzione più regolare e meno intense. Uno stesso sistema può quindi avere delle prestazioni differenti a seconda della situazione climatica in cui si trova (Abram 2006; Fioretti et al. 2010; Mentens et al. 2006).

Di importante considerazione sono inoltre gli andamenti stagionali: durante l'estate le alte temperature comportano una maggiore evapotraspirazione del sistema, grazie anche al fatto che le piante sono in piena attività vegetativa, con una conseguente maggiore ritenzione idrica rispetto al periodo invernale (Abram 2006; Mentens et al. 2006).

Utile al fine di introdurre il verde pensile come strumento di compensazione e mitigazione del dissesto idrogeologico urbano è, secondo Abram (2006), la determinazione di coefficienti di deflusso per i tetti verdi, per il calcolo del loro contributo alla regimazione idrica. ISPRA (2012) lo considera il parametro più semplice da determinare sul sistema nel suo insieme.

Il coefficiente di deflusso può essere definito come la percentuale di acqua che defluisce da un sistema rispetto a quella in input, in un tempo definito e in condizioni critiche per intensità di pioggia e saturazione del sistema (ISPRA 2012).

Abram (2006) riporta i valori di coefficiente di deflusso calcolati da FLL, la società di ricerca, sviluppo e costruzione per il paesaggio tedesca, nel 2002 per diversi spessori di stratificazione. Il coefficiente varia da 0,7 per 2-4 cm di substrato a 0,1 per 50 cm di substrato, valore paragonabile a una superficie verde a terra.

Un'altra possibilità, di cui si fa riferimento in questa tesi, è la valutazione del Curve Number CN, secondo il metodo del Soil Conservation Service americano, che propone un modello di formazione del deflusso dipendente dalla natura del terreno e dall'uso del suolo nonché dalle condizioni antecedenti di precipitazione.

Interessante può essere inoltre la sinergia tra tetti verdi e sistemi di recupero dell'acqua piovana. Abram (2006) porta l'esempio del Daymmer Chrysler in Postdam Platz a Berlino dove il verde pensile è collegato a sistemi di accumulo, riutilizzo ed infiltrazione dell'acqua piovana, come bacini naturali di infiltrazione e laminazione, riutilizzo per gli sciacquoni e per l'irrigazione delle aree verdi.

In alcuni studi vengono impiegati anche sistemi per la depurazione e il riciclo delle acque meteoriche, ad esempio nel sistema GROW (Green Roof Water Recycling System) dell'Università di Cranfield in Inghilterra (Abram 2006).

Il beneficio idrologico caratterizza quindi il verde pensile in modo evidente e diretto come strumento sostitutivo o integrante del verde a terra (Abram 2006) nel ridurre il deflusso superficiale durante eventi meteorici intensi (Giacomello 2012).

Questi studi sono stati tuttavia effettuati principalmente in centro Europa e mal si adattano spesso alle condizioni dell'ambiente mediterraneo. Pochi sono gli studi sul comportamento delle coperture a verde in ambienti mediterranei per cui non è ancora chiaro il concreto e misurabile beneficio che le coperture possono portare in questi contesti climatici.

Un altro aspetto molto indagato e quantificabile è quello termodinamico. Al verde pensile infatti sono già state riconosciute diverse funzioni da questo punto di vista. Lo stesso DPR 59/2009 ne promuove l'utilizzo per queste ragioni (ISPRA 2012).

In sostanza quindi si ha un risparmio energetico per isolamento termico in periodo invernale ed un controllo delle temperature in periodo estivo, con conseguente minore spesa per riscaldamento e condizionamento. Inoltre la riduzione delle oscillazioni di temperatura influenza positivamente la durata degli strati impermeabilizzanti e dei materiali costruttivi altrimenti sottoposti a sollecitazioni per dilatazione e contrazione del materiale, aumentandone quindi la vita utile, con una riduzione dei costi per la sostituzione (Abram 2006; ISPRA 2012).

In Figura 7 si può notare la differenza tra l'oscillazione della temperatura nel caso di una copertura non vegetata e nel caso di un tetto verde, dove invece la temperatura risulta molto costante (Fioretti et al. 2010).

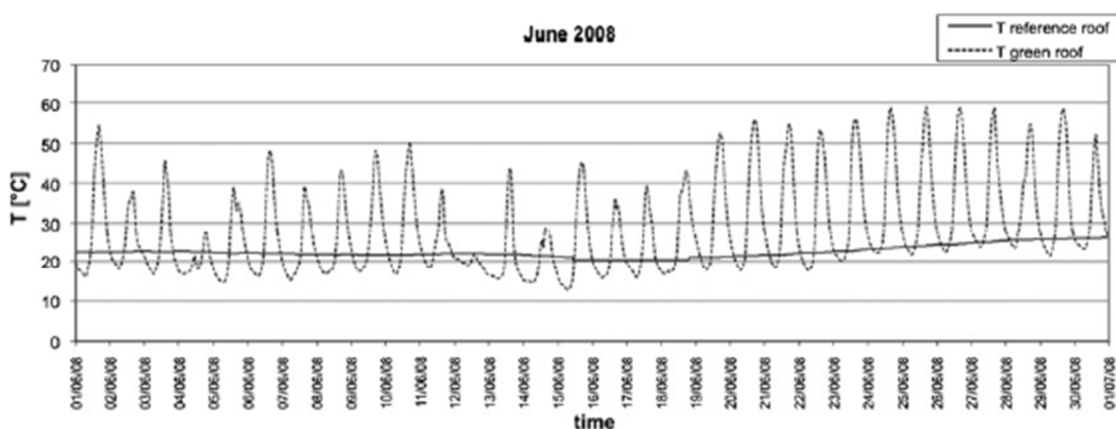


Figura 7: Grafico di temperatura di un tetto verde e di una copertura tradizionale (Fioretti et al. 2010)

ISPRA (2012) propone inoltre una tabella in cui a seconda dello spessore del substrato identifica la prestazione termodinamica del sistema (Figura 8).

Spessore di substrato a compattazione avvenuta	Prestazione termodinamica
8 cm	Riduzione delle temperature massime all'estradosso del tetto, delle gelate e delle escursioni termiche. Funzionale all'aumento della durata di vita dell'impermeabilizzazione.
15 cm	Riduzione del carico termico sulla copertura. Buono sfasamento temporale del flusso di calore: su strutture coibentate è da aspettarsi uno sfasamento di 7 - 8 h. Permette di ritardare l'ingresso del calore alla seconda metà della giornata.
20 cm	Riduzione del carico termico in ingresso e raffreddamento passivo. Elevato sfasamento temporale del flusso di calore: su strutture realizzate a norma è da aspettarsi uno sfasamento superiore alle 12 h. permette di ritardare l'ingresso del calore al periodo notturno e raffreddare nelle ore centrali della giornata.
Variabile da 15 a 35 cm	Contributo alla mitigazione dell'isola di calore nell'ambiente esterno, ricreando vegetazione mista a prato e grossi arbusti.

Figura 8: Spessori di substrato in funzione della prestazione termodinamica attesa (ISPRA 2012)

All'aumentare dello spessore di substrato e alla diversificazione e complessità vegetazionale, un tetto verde può anche influire positivamente sul microclima, contribuendo a ridurre il fenomeno di isola di calore urbana (ISPRA 2012; Sutton 2015). Le temperature superficiali e atmosferiche sono infatti più elevate nei centri urbani rispetto alle circostanti aree rurali: da 1 a 8°C di differenza, secondo alcuni studi anche fino a 12°C, in particolar modo di notte (Figura 9) (McPherson 1994; U.S. Environmental Protection Agency 2008).

Le superfici di tetti e pavimentazioni hanno infatti un'albedo molto bassa e senza nessun ombreggiamento assorbono la radiazione solare rimettendola poi come radiazione infrarossa e quindi emettendo calore (Figura 10), aumentando la temperatura della superficie fino a +50°C rispetto a quella dell'aria (U.S. Environmental Protection Agency 2008). La copertura a verde in questo caso può fungere da buffer termo-igrometrico per ridurre il fenomeno di isola di calore (Giacomello 2012).

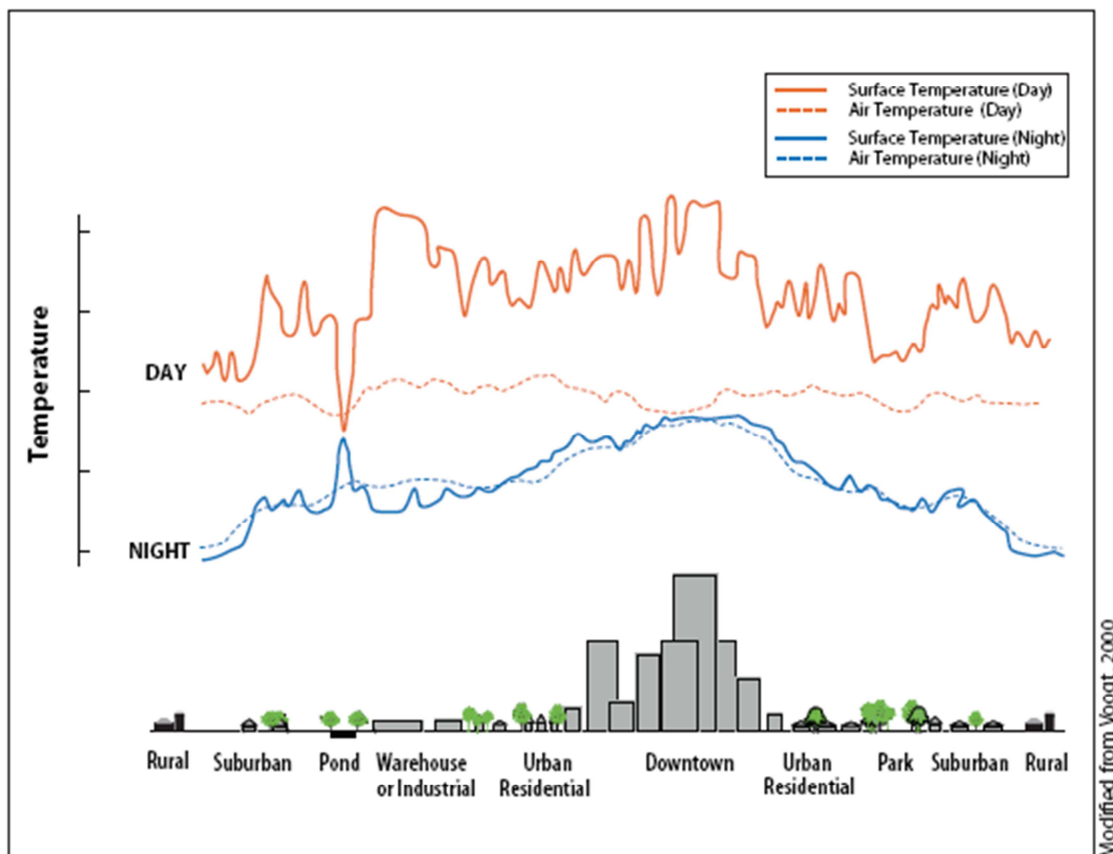


Figura 9: Variazioni di temperatura atmosferica e superficiale (U.S. Environmental Protection Agency 2008)



Figura 10: Differenza di temperatura tra un tetto verde ed uno convenzionale (U.S. Environmental Protection Agency 2008)

Secondo uno studio di Kolb e Schwarz (1986) la riduzione della variazione di temperatura diurna può variare fino al 94% con una diminuzione media delle temperature estreme tra giorno e notte di anche 12°C, anche se il livello di riduzione è fortemente dipendente, secondo Dunnett et al. (2008), dal tipo di vegetazione impiegato. Infatti suggerisce come una maggiore altezza e complessità della vegetazione formi e trattenga un maggiore cuscino d'aria tra la copertura e l'esterno, producendo un maggiore effetto isolante. Secondo Dunnett et al. (2008) inoltre, con una larga varietà di graminacee

tipiche di prati naturali dell'Europa centrale, la temperatura massima estiva in un sistema di controllo non vegetato è più alta del 67% rispetto al sistema vegetato.

Sempre Kolb e Schwarz (1986) affermano inoltre che in inverno con vegetazione sempreverde uniforme, sfruttando il suddetto effetto cuscino d'aria, la temperatura possa essere mitigata maggiormente che in presenza di vegetazione erbacea che secca e deperisce.

Inoltre la vegetazione permette la deposizione di gas e particelle, ad esempio di PM₁₀, O₃, NO₂, tramite assorbimento degli inquinanti gassosi attraverso gli stomi e nei tessuti fogliari e grazie all'abbattimento delle polveri per sedimentazione, impatto, dilavamento e deposizione nel suolo con le precipitazioni (Stewart et al. 2002).

Inoltre, come sottolinea Berndtsson et al. (2009), per quanto non siano da trattarsi come sistemi specifici per il trattamento delle acque meteoriche, non ne peggiorano la qualità e possono anzi trattenere una parte di azoto nitrico e ammoniacale, oltre alle polveri sottili. Tuttavia, come riporta lo studio ISPRA (2012), vi è una notevole differenza tra le prestazioni dei sistemi, dovute principalmente alla biomassa, infatti alberi e arbusti risultano favoriti grazie alla elevata superficie fogliare. Per lo stesso motivo su spessori bassi di copertura è da preferire una superficie a prato rispetto al Sedum.

Per quanto i tetti verdi non possano sostituire completamente un habitat naturale, molto più complesso e ricco di biodiversità, possono tuttavia supplire ad alcune delle sue funzioni, ricreando ad esempio dei corridoi ecologici per gli insetti e gli uccelli in città.

In particolare, inserendo specie vegetali autoctone e non creando una composizione monovarietale è possibile portare un guadagno in termini ecologici oltre che una maggiore resistenza e resilienza della vegetazione; tutto ciò è inoltre utile a innescare la formazione di ecosistemi semi-naturali in aree altrimenti non più disponibili per lo sviluppo di un ecosistema complesso (ISPRA 2012), contrastando la distruzione di ambienti semi-naturali (Francis and Lorimer 2011; Oberndorfer et al. 2007; Van Mechelen et al. 2014). Anche Sutton (2015) afferma come i tetti verdi permettano un ristabilimento parziale di habitat e nicchie ecologiche per piante, insetti ed uccelli; in particolare, le fioriture attraggono gli insetti impollinatori. In Figura 11 un esempio di stratigrafia di un biotopo pensile.



Figura 11: Esempio di stratigrafia di biotopo pensile ideato da Bauder (Bauder S.r.l. 2015)

1.2 Tipologie e composizione

Innanzitutto un tetto verde è definito come una realizzazione a verde su una superficie non in contatto con il suolo naturale e posta sopra ad un edificio. La copertura a verde è caratterizzata da diversi strati, considerati parte integrante della copertura dell'edificio: vegetazione, substrato, strato drenante e filtrante, strato protettivo, elemento di tenuta idrica. Questi elementi formano un unico sistema sia dal punto di vista funzionale che dal punto di vista progettuale (Abram 2006; ISPRA 2012). I sistemi possono essere classificati secondo vari parametri.

Tendenzialmente si utilizza come discriminante il livello di manutenzione richiesto dal sistema e quindi si distinguono i sistemi estensivi, in cui la manutenzione è molto bassa, da sistemi intensivi in cui invece la manutenzione è più onerosa. Oppure si possono distinguere per via delle tipologie di vegetazione e quindi: a prato fruibile con gestione intensiva oppure a prato maggiormente naturaliforme, con specie tipiche di prati aridi; a tappeto di sedum; a erbacee perenni, particolarmente apprezzate per le fioriture; ad arbusti tappezzanti e suffrutici; fino a realizzazioni che sono in tutto e per tutto dei giardini pensili, caratterizzati da siepi e piante ad alto fusto e orti. ISPRA (2012) ad esempio fa riferimento ad una divisione di questo genere riportando anche una interessante tabella riassuntiva delle tipologie con le proprietà più comuni dei sistemi (Figura 12).

Caratteristiche	Tipo sistema (espresso in base alla vegetazione prevista)						
	Prato fruibile	Tappeto di sedum	Prato - pascolo	Tappeto di perenni	Arbusti e suffrutici	Orto	Siepi ed alberi
Spessore substrato (cm)	15-25	8-10	12-15	10-15	15-35	25-35	35-100
Peso (kg/m ²)	220 – 400	120-160	160 – 300	120-300	220-550	300/550	450/1500
Coefficiente deflusso	0,35-0,25	0,50-0,40	0,40-0,30	0,40-0,35	0,35-0,15	0,25-0,20	<0,20
Manutenzione	Medio alta	Medio-Bassa	Bassa	Medio-bassa	Medio-bassa	Alta	Medio-alta
Fabbisogno idrico	Alto	Basso	Basso	Medio-basso	Medio-basso	Alto	Alto
Fruibilità	Alta	Nulla	Bassa	Bassa	Media	Media	Alta
Isolamento termico	Alto	Basso	Medio	Medio-basso	Alto	Alto	Alto
Abbattimento inquinanti (PM10, O ₃ , NO _x , CO ₂ , SO ₂)	Medio	Basso	Medio	Medio-basso	Medio	Basso	Alto
Tasso di concimazione	Alto	Basso	Basso	Medio-basso	Medio	Medio-alto	Alto

Figura 12: Proprietà più comuni delle varie tipologie di tetto verde (SPRA 2012)

Una copertura a verde pensile estensivo è un sistema che richiede una manutenzione ridotta. L'approvvigionamento idrico e di sostanze nutritive è di emergenza (Van Mechelen et al. 2014). L'intero sistema dunque è progettato per essere il più autosufficiente possibile. La vegetazione impiegata è costituita da piante con una buona capacità di propagazione e rigenerazione, resistenti a condizioni climatiche estreme, quali siccità ed alte temperature ma anche gelo. Solitamente lo spessore di substrato è ridotto ed è costituito da componenti minerali.

La limitazione di un sistema di tipo estensivo è che un più basso strato colturale ha una minore e finita capacità di ritenzione idrica (Stovin et al. 2012) ed è più facile che si raggiungano condizioni di scarsa umidità per cui si ha stress idrico delle piante durante periodi di siccità prolungati (Berretta et al. 2014). Per questo motivo ISPRA (2012) suggerisce caldamente di inserire sempre un impianto di irrigazione, anche per i sistemi estensivi, in ambiente mediterraneo.

I sistemi estensivi sono solitamente utilizzati su coperture ampie, come capannoni industriali, oppure su edifici preesistenti con scarsa capacità strutturale (Abram 2006).

Una copertura a verde pensile intensivo invece richiede una manutenzione maggiore e più frequente, nonché più costosa. Sono previsti un impianto di irrigazione stabile e delle concimazioni regolari. Gli spessori di substrato sono solitamente maggiori e vengono impiegate specie ornamentali: tappeto erboso, arbusti e in alcuni casi anche alberi. Vengono insomma realizzati dei veri e propri giardini pensili fruibili.

Il sistema è caratterizzato da stratificazioni "multistrato" in cui sopra all'elemento portante vengono posti: barriera al vapore, isolamento termico, elemento di tenuta con protezione antiradice, strato di protezione meccanico, strato drenante, strato filtrante, substrato e vegetazione, secondo normativa.

Nel caso di studio i microcosmi di prova sono predisposti con sistema di verde pensile estensivo, limitati spessori di substrato e miscugli di specie vegetali rustiche, inoltre sono stati posti gli strati strettamente inerenti al sistema vegetato e quindi strato drenante, strato filtrante, substrato e vegetazione.

1.3 Normativa

In Germania le prime linee guida alla progettazione del verde pensile vengono pubblicate nel 1998, da parte della FLL, società di ricerca, sviluppo e costruzione per il paesaggio.

Queste linee guida, sviluppate grazie alla ricerca e all'esperienza acquisite, sono tutt'ora un punto di riferimento a livello internazionale per la progettazione, la costruzione e la manutenzione dei tetti verdi (Van Mechelen et al. 2014).

Gli standard tedeschi tuttavia sono molto validi per un clima temperato, tipico del Nord Europa, e quindi non sempre validi per altre regioni con climi differenti dove l'applicazione degli stessi può invece comportare dei problemi (Dvorak and Volder 2010). In ambiente mediterraneo questi possono essere dovuti principalmente alle frequenti elevate temperature e al periodo siccitoso estivo più prolungato (Benvenuti and Bacci 2010). Le piante reagiscono quindi diversamente, a causa dello stress idrico che comporta una manutenzione e una irrigazione più onerose e delle scarse performance del sistema (Van Mechelen et al. 2014).

Per questo è fondamentale lo sviluppo di linee guida e normative specifiche per ogni regione.

In Italia, a livello nazionale, il primo importante passo è la pubblicazione nel 2007 della norma UNI 11235:2007 per "La progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione delle coperture a verde pensile", poi aggiornata e sostituita nel 2015. Questa norma rappresenta la regola dell'arte in Italia (Ispra, 2012).

Il verde pensile viene definito come un "sistema tetto" in tutta la sua completezza e vengono definiti i requisiti minimi di tutti gli elementi che ne compongono la stratigrafia. Tra questi elementi quelli primari devono sempre essere presenti e sono:

- Elemento portante
- Elemento di tenuta all'acqua
- Elemento di protezione all'azione delle radici (integrato o meno)
- Elemento di protezione meccanica
- Elemento di accumulo idrico
- Elemento drenante
- Elemento filtrante

- Strato colturale
- Strato di vegetazione

Per ciascuno la norma descrive le tipologie comunemente diffuse e le prestazioni che devono garantire. Le varie caratteristiche sono spesso determinate da una serie di ulteriori norme a cui la 11235 fa riferimento (ISPRA 2012). In Figura 13 un esempio di parametro tratto dalla norma.

Tipo di vegetazione	Spessore dello strato colturale (cm)							
	8	10	15	20	30	50	80	100
Sedum	■							
Erbacee perenni a piccolo sviluppo		■						
Grandi erbacee perenni, piccoli arbusti tappezzanti			■					
Tappeti erbosi								
Arbusti di piccola taglia				■				
Arbusti di grande taglia e piccoli alberi					■			
Alberi di III grandezza						■		
Alberi di II grandezza							■	
Alberi di I grandezza								■

Figura 13: Spessori minimi di substrato in funzione della vegetazione da impiegare, UNI 11235:2007 (Ispra, 2012)

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) ha delineato inoltre delle linee guida prodotte in collaborazione e con il supporto tecnico del Coordinamento delle Associazioni Tecnico-Scientifiche Ambiente e Paesaggio (CATAP) che integrano la norma UNI. Queste linee guida si propongono di incentivare i progettisti a 'descrivere il verde pensile nei capitolati d'appalto non solo sulla base di parametri poco significativi come l'elenco dei materiali o la quantità di acqua massima trattenuta, ma sulla base di prestazioni tecniche dell'intero sistema, come i coefficienti di deflusso, il contenuto di acqua disponibile, le specie vegetali da utilizzare, le strategie di gestione dell'irrigazione, le caratteristiche termodinamiche, in modo armonico con la funzionalità del complesso edificato' (ISPRA 2012)

Vengono quindi riportate le proprietà tecniche ritenute principali da ISPRA:

1. Spessore
2. Peso
3. Coefficiente di deflusso
4. Manutenzione
5. Fabbisogno idrico
6. Fruibilità
7. Isolamento termico
8. Abbattimento inquinanti
9. Tasso di concimazione

Un ulteriore avanzamento si ha nel 2013 con la pubblicazione della legge 10/2013 “Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani”, entrata in vigore dal 16 febbraio 2013.

Di particolare interesse per i tetti verdi è l’art. 6 ‘Promozione di iniziative locali per lo sviluppo degli spazi verdi urbani’ che prevede una promozione dell’incremento degli spazi verdi urbani da parte di Comuni e Province e dell’adozione di misure per favorire il risparmio energetico, l'assorbimento delle polveri sottili e la riduzione dell’effetto ‘isola di calore’ assieme ad una regolare raccolta delle acque piovane. Tutto ciò con particolare riferimento, tra tutte, alle coperture a verde, presentate come ‘strutture dell'involucro edilizio atte a produrre risparmio energetico’, per favorire, per quanto possibile ‘la trasformazione dei lastrici solari in giardini pensili’ (AIVEP 2013; Legge 10/2013).

Infine il Comitato per lo sviluppo del verde pubblico, promosso dall'art. 3 della legge 10/2013, con la sua prima delibera del 14 Aprile 2014, sancisce la possibilità di usufruire delle detrazioni fiscali per la costruzione di tetti verdi, essendo inquadrati tra le opere che migliorano l’efficienza energetica degli edifici, dietro presentazione di una certificazione energetica dell’edificio, che attesti l’effettivo miglioramento delle prestazioni energetiche prodotte dalla copertura a verde realizzata (AIVEP 2013).

A livello locale poi alcune regioni ed alcuni comuni si sono mossi di propria iniziativa.

Nel caso per esempio del comune di Bolzano dal 2004 nel proprio Regolamento Edilizio è stato adottato un indice RIE, acronimo per Riduzione Impatto Edilizio, che impone l'adozione di soluzioni che favoriscano la permeabilità dei suoli. Altri due esempi si hanno in Emilia Romagna dove Reggio Emilia e Rimini, in particolare, hanno previsto l'attribuzione di incentivi volumetrici ed economici per soluzioni edilizie ecosostenibili tra cui quelle che prevedono giardini pensili.

2. OBIETTIVI

Il progetto di Ateneo “In situ sustainable management of stormwater runoff by mean of green roofs: evaluation of systems suitable for Venetian Plain’ si pone di analizzare il comportamento idrologico di un sistema di verde pensile in un ambiente mediterraneo andando ad arricchire la panoramica della ricerca per le regioni mediterranee.

Lo scopo di questa tesi è studiare il comportamento idrologico di sistemi di tetto verde, tramite la simulazione in laboratorio di eventi meteorici intensi su diverse combinazioni di substrato, drenante e vegetazione, in condizioni di umidità critiche.

Si intende quindi verificare e quantificare la capacità dei vari microcosmi di gestire il deflusso, garantendo un effetto di laminazione di piogge intense. Si è deciso in particolare di ricavare la capacità di ritenzione idrica, parametro che influenza in modo determinante il deflusso, e il Curve Number dell’omonimo modello afflussi-deflussi del Soil Conservation Service per i sistemi di verde pensile testati.

Inoltre si vuole analizzare l’effetto che la vegetazione ha sulla performance dei sistemi, confrontando i comportamenti di microcosmi con e senza vegetazione, in generale e nello specifico per i tre miscugli di specie utilizzati: Sedum, erbacee perenni e suffruticose.

3. MATERIALI E METODI

3.1 Inquadramento dello studio

Per meglio comprendere in che contesto si inserisca il presente lavoro di tesi si è ritenuto necessario proporre un excursus di quanto fatto in precedenti lavori di tesi sugli stessi elementi utilizzati per questo studio, in modo da avere una più chiara visione di insieme del lavoro svolto nel contesto del progetto di ateneo in cui tutte queste prove rientrano.

Il progetto di Ateneo 'In situ sustainable management of stormwater runoff by mean of green roofs: evaluation of systems suitable for Venetian Plain', avviato nel 2013, ha previsto l'installazione di microcosmi con diversi miscugli di vegetazione in combinazione con diversi substrati e sistemi di accumulo e drenaggio, per un totale di 39 microcosmi, all'interno del campus di Agripolis, Legnaro (Padova) (Figura 14).



Figura 14: Inquadramento del sito di studio, in giallo sulla mappa il comune di Legnaro

Le caratteristiche climatiche considerate sono quindi quelle della pianura veneta. Essendo il Veneto in una posizione di transizione tra l'area continentale euro-asiatica e quella mediterranea, il clima presenta caratteristiche sia di mediterraneità, in particolar modo dovute all'influsso mitigatore del Mediterraneo sulle zone costiere, che di continentalità. Gli inverni sono relativamente rigidi e le estati calde con temperature medie tra 13°C e 15°C e precipitazioni con totali annui mediamente tra 600 e 1100 mm; l'inverno risulta la stagione più secca, le stagioni intermedie sono invece caratterizzate da perturbazioni atlantiche e mediterranee e l'estate da tipici fenomeni temporaleschi (ARPAV 2011).

La prima sperimentazione è consistita innanzitutto in una prima parte di laboratorio, antecedente all'allestimento dei microcosmi e all'impianto della vegetazione. In laboratorio sono state fatte delle prove prima singolarmente e poi in combinata di diversi sistemi di accumulo e substrati di coltivazione, con lo scopo di analizzare la loro effettiva capacità di ritenzione e la velocità di drenaggio di una precipitazione simulata.

L'intensità e la durata di precipitazione da simulare sono state ricavate tramite l'elaborazione statistico-probabilistica delle piogge, da dati registrati dal 1992 al 2013 dalla stazione ARPAV nel campus di Agripolis (Simonato 2014). L'elaborazione dei massimi valori di pioggia è stata effettuata con la distribuzione di probabilità di Gumbel EV1, ottenendo per i tempi di ritorno voluti, ovvero 2 e 30 anni, rispettivamente 16,8 e 30,2 mm di pioggia. La durata di precipitazione considerata è di 10 minuti, volendo analizzare eventi meteorici brevi ma intensi.

Quindi sono stati allestiti i microcosmi di prova ed è stato eseguito l'impianto dei miscugli di vegetazione a maggio del 2014; i microcosmi sono stati poi posti in campo ed è iniziata una fase di sperimentazione di campo. Sono state monitorate le piogge avvenute e i quantitativi di acqua trattenuti e drenati dai microcosmi.

Il presente lavoro di tesi si inserisce alla fine del ciclo di sperimentazione in campo. Essendosi la vegetazione ben sviluppata, è stato deciso di avviare una nuova prova di laboratorio conclusiva.

Sono state eseguite quindi prove di simulazione di pioggia, come nella prima sperimentazione iniziale, ma sul sistema completo con vegetazione sviluppata. Si è scelto un microcosmo per ogni combinazione in modo da ottimizzare le tempistiche di lavoro, scegliendo il campione più sviluppato e meglio rappresentativo della tipologia, per un totale di 12 microcosmi.

Nei paragrafi seguenti si procederà a descrivere la composizione dei microcosmi di studio, il simulatore di pioggia ed il suo funzionamento e come si sono raccolti ed elaborati i dati.

3.2 Microcosmi

3.2.1 Generale

Ogni microcosmo è costituito da una cassetta in PVC di dimensioni 60x80x22 cm con 0,44 m² di superficie interna, sul cui fondo vi è un foro di scarico con un raccordo filettato a cui è possibile avvitare un tubo di gomma per indirizzare l'acqua in uscita (Figura 15). Ogni cassetta contiene vari substrati che compongono un sistema di verde pensile, come descritto più dettagliatamente in seguito.



Figura 15: Cassetta posta in sede sulla bilancia, ben visibile il tubo di scarico raccordato alla cassetta

Tra le cassette delle prove precedenti ne sono state scelte 12, rappresentative di ciascuna combinazione delle diverse componenti. Le combinazioni sono illustrate in Tabella 1.

Tabella 1: Descrizione delle combinazioni di microcosmi

ID	Vegetazione	Substrato	Accumulo
3	B	VU	PI
6	C	VU	PI
7	C	ZN	PI
8	A	ZN	BA
9	B	ZN	PI
11	A	VU	BA
12	B	VU	BA
13	A	ZN	PI
19	B	ZN	BA
32	C	VU	BA
34	A	VU	PI
35	C	ZN	BA
Legenda			
Tipo di vegetazione	A	Sedum	
	B	Erbacee perenni	
	C	Suffrutticose	
Tipo di substrato	VU	Vulcanico estensivo	
	ZN	Laterizio riciclato	

Strato di accumulo/drenaggio	PI	Sacchi di perlite
	BA	Preformato in polietilene

In foto sono presentate le cassette con i vari tipi di vegetazione, quella con il Sedum (Figura 16), con le specie erbacee (Figura 17) e con le specie suffruticose (Figura 18).



Figura 16: Microcosmo con Sedum (miscuglio A)



Figura 17: Microcosmo con specie erbacee (miscuglio B)



Figura 18: Microcosmo con specie suffruticose (miscuglio C)

Nei successivi paragrafi si tratterà schematicamente dei componenti costitutivi dei microcosmi. Per i dettagli di assemblaggio delle cassette si rimanda al lavoro di tesi di Simonato (2014).

3.2.1 Stratigrafia

Di seguito si sono sinteticamente riportate le caratteristiche dei vari componenti del sistema. In ordine sono descritti quindi il substrato di coltivazione, lo strato filtrante, quello di accumulo e drenaggio e quello protettivo. La vegetazione è trattata in un paragrafo a sé stante. Il substrato ha profondità di 12 cm.

I sistemi di coltivazione sono, come visto nel paragrafo precedente in cui sono contrassegnati da lettere, di due tipi:

- Vulcanico estensivo (contrassegnato nelle prove come VU)

Substrato prodotto da Europomice s.r.l. conforme alla norma UNI 11235 per le coperture a verde, costituito dalla miscela di materiali vulcanici (90% lapillo vulcanico e 10% pomice di granulometria 0-10 mm) e torba bionda di granulometria media.

- Laterizio riciclato (contrassegnato nelle prove come ZN)

Substrato denominato Zincoterra 'Roccia fiorita' prodotto da ZinCo GmbH, composto da laterizio riciclato lavorato con eccipienti speciali e compost arricchito di materia fibrosa. In Tabella 2 le caratteristiche tecniche dei substrati riportate dalle schede dei fornitori.

Tabella 2: Caratteristiche tecniche dei substrati utilizzati (Europomice S.r.l. 2017; ZinCo Italia S.r.l. 2012)

Parametri	Vulcanico estensivo	Laterizio riciclato
Peso specifico	950 – 1050 kg/m ³	1000 kg/m ³
Peso materiale saturo di acqua	1300 kg/m ³	1400 kg/m ³
Granulometria	0 – 10 mm	–
Permeabilità	>0,6 mm/min saturo e compresso >6 mm/min in condizioni normali	0,6 – 70 mm/min
Sostanza organica	8%	<65 g/l
pH	7 – 8	6,5 – 8

Uno strato filtrante è stato posto tra il substrato e lo strato di accumulo e drenaggio, uguale per tutte le cassette:

- Strato filtrante

Lo strato filtrante è Bauder FV 125, un tessuto di filtro per inverdimenti estensivi e intensivi in polipropilene. In Tabella 3 le caratteristiche tecniche.

Tabella 3: Caratteristiche tecniche dello strato filtrante (Bauder S.r.l 2015)

Parametri	Strato filtrante
Peso [g/m ²]	125
Spessore [mm]	1,2

Gli strati di accumulo e drenaggio sono, invece, di due tipologie:

- Sacchi di perlite (contrassegnato nelle prove come PI)

Igroperlite di Perlite italiana è composta da un materassino di perlite espansa contenuta in un sacco di geotessile.

La perlite è un materiale leggero, con ottime proprietà fisiche, in particolare di termoisolamento, inoltre ha pH neutro ed è insolubile in acqua. Perlite Italiana è certificata in accordo con la norma UNI EN ISO 9001.

Il materassino utilizzato nella prova ha spessore di 6 cm, come da fornitura, ma le dimensioni sono state adattate, in quanto originariamente aveva una superficie di 0,90 m² (72 x 125 cm), eccessiva per la cassetta di prova. (Simonato, 2014).

- Profilo termoformato (contrassegnato nelle prove come BA)

Il secondo strato di accumulo e drenaggio utilizzato è Bauder DSE 40, un profilo termoformato in HDPE, resistente alla compressione progettato per l'accumulo e il drenaggio di tetti verdi, pavimentazioni e superfici carrabili. La capacità di drenaggio in piano è conforme EN ISO 12958, con carico 20 kPa.

In Tabella 4 le caratteristiche tecniche dei due materiali riportate dalle scheda dei produttori.

Tabella 4: Caratteristiche tecniche degli strati di accumulo e drenaggio (Bauder S.r.l. 2010; Perlite Italiana S.r.l. 2010)

Parametri	Perlite
Peso specifico [kg/m ³]	100
Granulometria [mm]	2 - 5
Porosità totale [%]	95,9
Capacità di accumulo idrico [L/m ²]	21
Parametri	Profilo termoformato
Peso [kg/m ²]	1,8
Capacità di accumulo idrico [L/m ²]	13,5
Volume di riempimento [L/m ²]	21

Gli strati protettivi, abbinati ai precedenti strati di accumulo e drenaggio delle rispettive ditte produttrici, sono:

- Georete Ecodren SD5

Ecodren SD5 di Perlite Italiana è un prodotto composito costituito da una georete accoppiata a caldo con un geotessile non tessuto ad azione filtrante.

- Fibra di poliestere e polipropilene FSM 1100

Bauder FSM 1100 è invece una fibra di poliestere e polipropilene fissata meccanicamente e termicamente, consigliato dal produttore solitamente come strato di protezione per impermeabilizzazioni bituminose e manti sintetici. Ha inoltre una buona capacità di insonorizzazione che risulta dalle caratteristiche ammortizzanti del tessuto.

In Tabella 5 le caratteristiche tecniche degli strati protettivi riportate dalle schede dei fornitori.

Tabella 5: Caratteristiche tecniche degli strati protettivi (Bauder S.r.l 2015; Perlite Italiana S.r.l. 2010)

Parametri	Georete	Fibra di poliestere e polipropilene
Massa volumica [g/m ²]	570	1100
Spessore [mm]	4,5	8

Durante le prove si è osservato che, per la conformazione del materiale, essendo una specie di tappetino di feltro, lo strato protettivo Bauder FSM 1100 tende ad ostruire leggermente il foro di scarico, probabilmente anche per via del compattamento che si è verificato negli anni di prova, andando a cambiare le tempistiche di drenaggio dell'acqua, questo è ben visibile dalla differenza che si nota tra i grafici dell'acqua drenata di microcosmi con Profilo termoformato e con perlite.

3.2.2 Vegetazione

La vegetazione che compone i miscugli utilizzati per le prove è costituita da specie autoctone che crescono su substrati tendenzialmente sciolti e poco profondi, in ambienti esposti a condizioni di vento e siccità.

Infatti, la scelta delle piante utilizzate su realizzazioni estensive deve ricadere su specie che presentino una elevata tolleranza alle oscillazioni della disponibilità idrica. Inoltre, una elevata capacità di autorigenerazione, specialmente a livello degli apparati radicali, facilita la formazione di associazioni vegetali stabili nel tempo (Salchegger 2006). Le specie devono anche avere una buona resistenza al freddo e al vento.

Alcune delle specie utilizzate sono state raccolte in prossimità del Medio Corso del Brenta nei pressi del Comune di Bassano del Grappa (VI), come *Potentilla pusilla* Host., *Thymus serpyllum* L., *Clinopodium nepeta* L., *Euphorbia cyparissias* L. e *Sedum sexangulare* L., mentre le altre sono state fornite da Veneto Agricoltura (Simonato 2014).

Queste specie sono parte di consociazioni erbacee xerofile presenti su terrazzi ghiaiosi caratterizzati da bassi livelli di fertilità e di umidità edafica, con copertura spesso parziale e composta da classe Sedo-Scleranthetea e da Brometalia. I prati aridi, localizzati solo nel tratto perifluviale settentrionale, sono spesso soggetti a intensi fenomeni di disturbo antropico che determinano una forte degradazione della loro composizione floristica (Simonato 2014).

I miscugli di vegetazione ottenuti sono tre:

- A) Sedum
- B) Erbacee perenni
- C) Suffruticose

In sintesi in Tabella 6 segue un elenco delle specie presenti nei tre miscugli.

Tabella 6: Elenco delle specie presenti per i diversi miscugli dei microcosmi

Miscuglio	Specie presenti
A – Sedum	<i>Sedum acre</i> L.
	<i>Sedum album</i> L.
	<i>Sedum reflexum</i> L.
	<i>Sedum sexangulare</i> L.
B – Erbacee perenni	<i>Bromus erectus</i> H.
	<i>Campanula spicata</i> L.
	<i>Euphorbia cyparissias</i> L.
	<i>Melica ciliata</i> L.
	<i>Potentilla pulsilla</i> Host.
C – Suffruticose	<i>Artemisia alba</i> L.
	<i>Clinopodium nepeta</i> L.
	<i>Dianthus carthusianorum</i> L.
	<i>Dianthus hyssopifolius</i> L.
	<i>Dianthus sylvestris</i> W.
	<i>Thymus serpyllum</i> L.

Si descrivono quindi brevemente le caratteristiche dei miscugli e delle specie che li compongono, principalmente dal punto di vista dell'impiego in quanto si rimanda, per le descrizioni delle specie, a bibliografia specifica.

A) Sedum

Il Sedum è il genere più tipico, soprattutto nel nord Europa, per la realizzazione dei tetti verdi estensivi, in quanto di facilissima propagazione e bassissime necessità in acqua e nutrienti, date le foglie carnose.

Il miscuglio utilizzato è costituito da quattro specie di Sedum, tutte tendenzialmente pioniere su rocce assolate calde e secche, muri, massicciate ferroviarie, tetti zavorrati con ghiaia, crepe nell'asfalto, cave di ghiaia (Sphon and Spohn 2013).

Nei microcosmi di studio la specie che visivamente si nota maggiormente è il *Sedum reflexum* L. (Figura 19), che si è ben sviluppato e in periodo di fioritura è molto vistoso con le sue infiorescenze gialle. Inoltre la varietà con le foglie di colore tendente all'azzurro spicca bene sulle altre specie a foglia verde.



Figura 19: *Sedum reflexum* L.

Il *Sedum acre* L. invece, essendo una specie a rapido accrescimento ma poco longeva che frequentemente dopo un paio d'anni va a seme e muore, risulta essere più rada, come ben visibile in Figura 20; migliore da consociare quindi con specie più longeve (Salchegger 2006).

Anche il *Sedum album* L. **Error! Reference source not found.** forma nel tempo una copertura rada, come si nota nei microcosmi di studio in cui in alcune zone si presenta solo come fusti striscianti (Figura 20). Tuttavia ha diverse colorazioni delle foglie, interessanti dal punto di vista della composizione cromatica ed è molto resistente alla competizione (Salchegger 2006).



Figura 20: *Sedum acre* L. in mezzo ai fusti striscianti di *Sedum album* L.

Invece il *Sedum sexangulare* L. (Figura 21) forma dei bei cuscini compatti di vegetazione (Salchegger 2006), oltre ad avere anche questa una bella infiorescenza gialla.



Figura 21: *Sedum sexangulare* L.

B) Erbacee perenni

Il miscuglio ad erbacee perenni include specie tipiche di prati aridi. Di maggiore diversità e più complesso del miscuglio a Sedum presenta una maggiore diversità strutturale che gli permette di essere un habitat migliore per uccelli ed insetti, oltre ad essere esteticamente più vario e più simile a prati autoctoni.

Tuttavia è il miscuglio con la copertura più variabile nelle stagioni, infatti in inverno le specie seccano in quanto non sempreverdi, incidendo molto sulle percentuali di copertura invernali. In ogni caso la ricrescita primaverile è molto rapida e la copertura nei mesi vegetativi è bella densa.

Tra le specie inserite l'*Euphorbia cyparissias* L. (Erba cipressina)(Figura 22), specie che vive in prati e pascoli magri su substrato calcareo, ma anche su sentieri, bordi di campi, scarpate, terreni incolti e lungo le strade (Dalla Fior 1985; Spohn and Spohn 2013), è caratterizzata da portamento eretto ed infiorescenze vistose accompagnate da brattee giallastre o rossastre, esteticamente molto valide.

Le due graminacee del miscuglio, *Bromus erectus* (Figura 23) e *Melica ciliata*, sono anch'esse caratteristiche di prati aridi, pendii soleggiati, stazioni steppiche, sono entrambe specie cespitose e non presentano quindi stoloni. L'accrescimento è radiale ma è, presumibilmente anche per le condizioni critiche in cui si trovano, abbastanza lento.



Figura 22: Euphorbia cyparissias L.



Figura 23: Bromus erectus H

La *Campanula spicata* L. è tipica di ambienti sassosi e rupestri, con foglie pelose a rosetta basali e un'infiorescenza a spiga molto vistosa, ma non ha una copertura molto estesa e nei microcosmi di studio la sua presenza è molto limitata.

Dal bel portamento tappezzante che ricopre velocemente il terreno è invece la *Potentilla pusilla* Hort. (Figura 24), che si propaga bene anche per seme, con la presenza quindi nei microcosmi di molte piantine nate da seme. Chiaramente la copertura dipende dalla stagione in quanto non è sempreverde e in periodo invernale secca, per poi rispuntare a primavera.



Figura 24: *Potentilla pulsilla* Hort.

C) Suffruticose

Il miscuglio a specie suffruticose è caratterizzato da specie semi-arbustive, camefite, legnose alla base con germogli erbacei che generalmente seccano in inverno. In realtà in questo miscuglio ci sono specie che possono essere definite delle erbacee perenni, come i *Dianthus*.

L'habitat formato è ancora più completo e complesso rispetto al miscuglio di erbacee, in quanto la struttura rimane anche in inverno e sono presenti delle specie sempreverdi.

L'*Artemisia alba* L. (Figura 25), tipica specie di origine steppica, è spontanea in prati aridi calcarei e forma dei cespuglietti di vegetazione ben sviluppati dall'aroma particolare. È molto resistente alla siccità e anche se secca per carenza d'acqua, rigetta dai fusti legnosi al ritorno di migliori condizioni idriche.

Per quanto riguarda *Clinopodium nepeta* L. (Figura 26) si propaga molto facilmente per seme ma ha una distribuzione abbastanza rada e discontinua ed è scarsamente presente nei microcosmi di studio.



Figura 25: *Artemisia alba* L.



Figura 26: *Clinopodium nepeta* L.

Il genere *Dianthus* è rappresentato da ben tre specie: *D. carthusianorum* L., *D. hyssopifolius* L., *D. sylvestris* L.. *D. carthusianorum* L. (Figura 27) forma coperture rade fino a 40 cm di altezza, si riproduce abbondantemente per seme (Salchegger 2006), tipico di pendii erbosi soleggiati generalmente su suoli calcarei, può crescere anche nelle crepe tra le rocce e necessita di molto calore (Dalla Fior 1985; Spohn and Spohn 2013). *D. sylvestris* W. (Figura 28), più basso del precedente, fino a 30 cm, ha le foglie strettamente lineari, acute e scabre al margine. Diffuso nei pascoli sassosi e, come suggerisce il nome, ai margini dei boschi (Dalla Fior 1985).

Il *Thymus serpyllum* L. inizialmente di crescita lenta, forma in seguito dei tappeti abbastanza densi, le foglie sono aromatiche ed emanano un gradevole profumo e i fiori, con corolla tubuloso-bilabiata, sono di un bel rosa purpureo più o meno intenso (Figura 29). Tipica di luoghi molto assolati, caldi e aridi, richiede ben poca terra per sopravvivere ed è quindi ottima per l'impiego nel verde pensile, anche su sistemi molto superficiali (8 cm substrato) (Pallavicini and Terzo 1986; Salchegger 2006)



Figura 27: *Dianthus carthusianorum* L.



Figura 28: *Dianthus sylvastris* W.



Figura 29: *Thymus serpyllum* L.

In origine nel miscuglio a suffruticose era inserita anche *Anthemis tinctoria* L., nei microcosmi di studio tuttavia non è presente per ritrovarsi invece spesso nata a seme nei microcosmi a Sedum.

3.3 Simulatore di pioggia

Il simulatore di pioggia (Figura 30) è stato costruito presso l'officina del Dipartimento TESAF appositamente per compiere queste prove.

Tramite una pompa (Figura 31) l'acqua contenuta in un serbatoio viene messa in pressione e inviata al simulatore passando per un apposito ugello di precisione; sono disponibili due diversi ugelli che possono essere usati alternativamente per le diverse prove a seconda dell'intensità di pioggia da simulare (con tempo di ritorno di 2 e 30 anni). Tramite un manometro viene regolata la pressione dell'acqua in arrivo all'ugello in modo che la portata sia costante e definita.

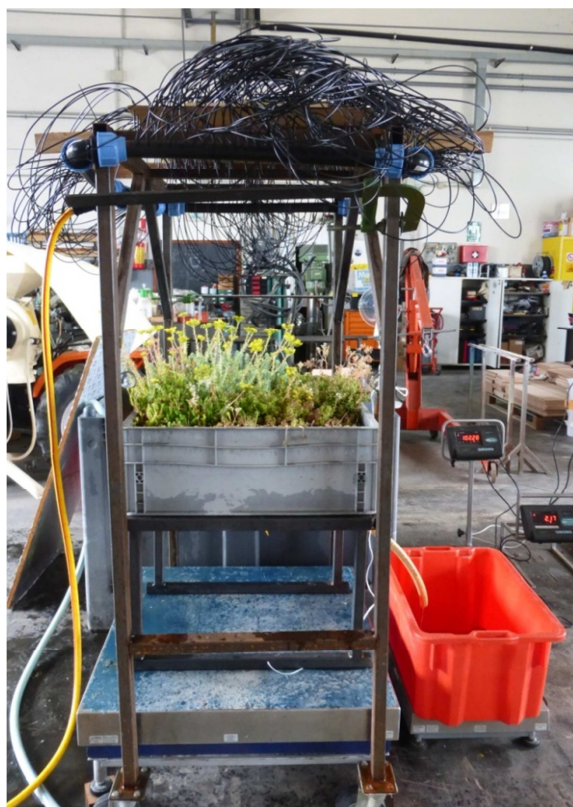


Figura 30: Simulatore di pioggia, setup tipico di una prova



Figura 31: Pompa utilizzata per portare in pressione l'acqua

L'ugello è collegato, tramite un sistema di tubi collettori (Figura 34), a dei tubi capillari. Questo sistema è montato su un carrello con struttura di ferro (Figura 32), al di sotto del quale è posta la cassetta di prova. I tubi capillari sono innestati su un pannello forato a maglia regolare, in modo da bagnare uniformemente la superficie della cassetta (Figura 33).

La cassetta è posta sopra una bilancia con una struttura in ferro. Ogni cassetta ha al centro un foro a cui viene collegato un tubo che scarica in un contenitore sopra ad una bilancia più piccola (Figura 35).

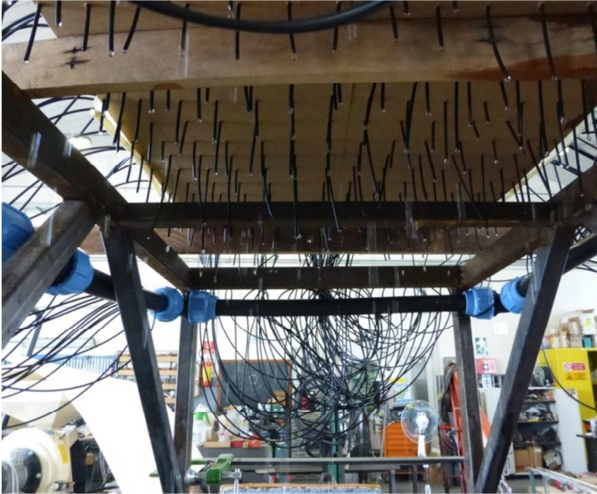


Figura 32: Dettaglio della struttura di sostegno e dei tubi collettori e capillari del simulatore di pioggia



Figura 33: Dettaglio del posizionamento a griglia dei tubi capillari nel pannello della struttura



Figura 34: Dettaglio del tubo collettore e dell'innesto con la presa d'acqua proveniente dalla pompa



Figura 35: Dettaglio dello scarico che convoglia l'acqua drenata nel contenitore per la pesata



Figura 36: Manometro raccordato alla pompa per regolare con precisione la pressione in uscita

Le bilance utilizzate sono bilance WE-T di Laumas elettronica: una con portata massima di 600 kg e sensibilità 1 g, per pesare la cassetta microcosmo di tetto verde, e l'altra con portata massima di 80 kg e sensibilità 1 g, per pesare il contenitore dell'acqua drenata. Le bilance sono collegate ciascuna a un datalogger della stessa marca che registra tempo e pesi.

I dati sono registrati in un computer dal programma CheckWeight di ALPI Sistemi s.r.l..

Gli ugelli sono quelli utilizzati per l'agricoltura di precisione di TeeJet technologies: un ugello a fessura Extended Range della serie XR TeeJet con portata maggiore, utilizzato per la pioggia con il tempo di ritorno di 30 anni, e un ugello a cono vuoto VisiFlo della serie Conejet con minor portata, utilizzato per simulare una pioggia di intensità con tempo di ritorno di 2 anni.

3.4 Raccolta ed elaborazione dei dati

3.4.1 Taratura e distribuzione di pioggia del simulatore

Per tarare il simulatore di pioggia inizialmente si è impostata la pressione secondo le specifiche tecniche degli ugelli utilizzati, per cui è indicata la portata per ogni pressione di funzionamento. Essendo tuttavia l'ugello collegato ad una serie di collettori e capillari è stato necessario tarare la pressione facendo una serie di prove per compensare le perdite di carico.

È stata posta una cassetta vuota uguale in forma e dimensione a quelle di prova senza il foro di scarico e si è verificato, tramite la pesata della cassetta con una bilancia, che il quantitativo di acqua emesso dal simulatore fosse quello corretto per il tempo di ritorno voluto. La simulazione è stata

ripetuta più volte fino a trovare la pressione corretta per i due ugelli. Una volta trovata la pressione giusta sono state fatte in serie tre prove per ciascun tempo di ritorno in modo da verificare l'effettivo funzionamento e se la portata rimaneva costante. La taratura, per precauzione, è stata effettuata comunque prima di ogni prova.

Inoltre, per valutare l'uniformità di distribuzione della pioggia all'interno della cassetta sono state fatte tre prove per tempo di ritorno, per un totale quindi di sei prove.

Sono state distribuite delle caraffe all'interno della cassetta di prova in modo da coprirne uniformemente tutta la superficie (Figura 37). Quindi si è proceduto a simulare una prova completa, impostando la corretta portata per il tempo di ritorno e mantenendo come durata di pioggia 10 minuti. Finita la prova è stato pesato, per ogni caraffa, il contenuto d'acqua e segnato su una griglia. In seguito i dati sono stati elaborati al netto del peso della caraffa.



Figura 37: Distribuzione delle caraffe all'interno della cassetta

I dati sono stati riportati in un raster per avere una visualizzazione grafica della distribuzione ed è stato calcolato l'indice di Christiansen per valutarne l'uniformità.

L'indice di Christiansen (C_u) in percentuale è calcolato come:

$$C_u = 100 \left(1 - \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{N \bar{x}} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

Dove:

x_i è la quantità d'acqua di ogni caraffa

\bar{x} è la media dei valori di x_i

N è il numero di caraffe

3.4.2 Simulazione di pioggia

La procedura adottata per simulare la pioggia è la seguente:

1. Sommersione in acqua del microcosmo per almeno 12 ore (messo in acqua il tardo pomeriggio e tirato fuori alle 7.00 della mattina successiva) (Figura 38)
2. Lasciare sgrondare la cassetta per 2 ore, tempo valutato sufficiente a drenare tutta l'acqua oltre la capacità di ritenuta del sistema
3. Disporre la cassetta sulla bilancia
4. Iter della prova:
 - a. pioggia per 10 minuti
 - b. 40 minuti di pausa
 - c. fine della registrazione dei dati
 - d. inizio della prova successiva

Sono state eseguite tre prove per ogni tempo di ritorno, in totale quindi sei prove per microcosmo.

Prima di iniziare le simulazioni di pioggia sul microcosmo con un determinato tempo di ritorno, si è effettuata ogni volta la taratura del simulatore, cambiando ogni tre prove l'ugello per variare l'intensità di pioggia.

Il programma di registrazione dei dati del computer registrava in simultanea il peso del microcosmo, il peso del contenitore dell'acqua drenata e l'orario. Questi dati venivano scritti su un file di testo in colonne. I pesi sono in kg.

La fine della prova era dopo i 50 minuti complessivi, quando non usciva quasi più acqua dalla cassetta e comunque la variazione nel deflusso non era significativa.



Figura 38: Immersione della cassetta in acqua per 12h

Calcolo della pioggia accumulata e deflusso

Quindi si è proceduto ad elaborare i dati ottenuti. La prima operazione è stata, oltre a riportare i dati di acqua accumulata (Eq. 2) e drenata (Eq. 3) al netto del peso iniziale e a trasformare l'orario in un tempo in secondi, trasformare i volumi d'acqua in mm di pioggia, ottenendo:

- S, ovvero la frazione di pioggia accumulata nel microcosmo (Eq. 4);
- D, ovvero la frazione di pioggia drenata che si può definire anche come pioggia efficace P_e (Eq. 5);
- P, che è la somma di S e D, ovvero la pioggia totale (Eq. 6)

Il peso del microcosmo che comprende anche quello della cassetta, della struttura di supporto e dello scarico è chiamato 'Peso campione', mentre il peso del contenitore di scarico e dell'acqua drenata in esso contenuta è chiamato 'Peso outflow'.

In Tabella 7 è riportato un esempio di dati e della loro elaborazione: in rosso sono indicati i dati registrati, in blu i dati elaborati di cui si è poi eseguita l'analisi. Le formule con cui si sono ricavati i vari valori sono di seguito esplicitate.

$$\text{Acqua accumulata} = \text{Peso campione} - \text{peso campione iniziale [L]} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{Acqua drenata} = \text{Peso outflow} - \text{peso outflow iniziale [L]} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$S = \text{Acqua accumulata} / \text{Area della cassetta [mm]} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$D = \text{Acqua drenata} / \text{Area della cassetta [mm]} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$P = S + D [mm] \quad (\text{Eq. 6})$$

Tabella 7: Esempio di prima elaborazione dei dati

Tempo [h,min,sec]	Peso campione [kg]	Peso outflow [kg]	Acqua accumulata [L]	Acqua drenata [L]	Tempo [s]	S [mm]	D [mm]	P [mm]
12.26.13	100,00	1,82	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
12.26.15	100,04	1,82	0,04	0,00	2	0,09	0,00	0,09
12.26.17	100,08	1,82	0,08	0,00	4	0,18	0,00	0,18
12.26.19	100,08	1,82	0,08	0,00	6	0,18	0,00	0,18
12.26.21	100,10	1,82	0,10	0,00	8	0,23	0,00	0,23
12.26.23	100,14	1,82	0,14	0,00	10	0,32	0,00	0,32
12.26.25	100,18	1,83	0,18	0,01	12	0,41	0,02	0,44
12.26.27	100,18	1,83	0,18	0,01	14	0,41	0,02	0,44
12.26.29	100,22	1,83	0,22	0,01	16	0,50	0,02	0,53
12.26.31	100,24	1,83	0,24	0,01	18	0,55	0,02	0,57
12.26.33	100,24	1,83	0,24	0,01	20	0,55	0,02	0,57
12.26.35	100,28	1,83	0,28	0,01	22	0,64	0,02	0,66
12.26.37	100,28	1,83	0,28	0,01	24	0,64	0,02	0,66
12.26.39	100,32	1,83	0,32	0,01	26	0,73	0,02	0,76
12.26.41	100,32	1,83	0,32	0,01	28	0,73	0,02	0,76
12.26.43	100,40	1,83	0,40	0,01	30	0,92	0,02	0,94
12.26.45	100,40	1,83	0,40	0,01	32	0,92	0,02	0,94

Quindi sono stati creati i grafici inserendo S e D in ordinata ed il tempo in ascissa.

Un esempio di grafico per una prova in Figura 39.

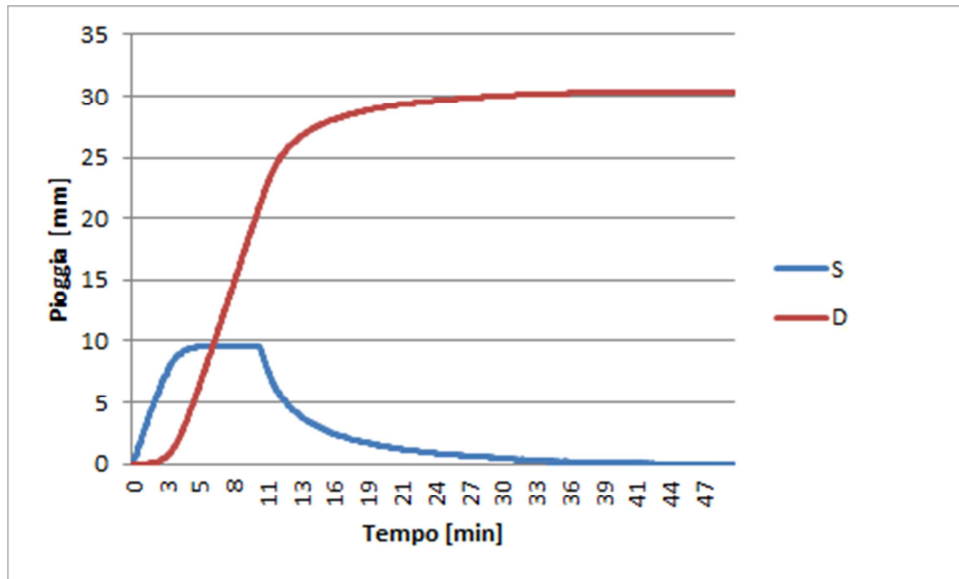


Figura 39: : Pioggia accumulata nel microcosmo (S) e pioggia drenata dallo stesso (D) in funzione del tempo per una prova con tempo di ritorno di 30 anni

Quindi si è proceduto a calcolare l'intensità di pioggia (J) (Eq. 7) e la velocità di deflusso (ρ) (Eq. 8). Data la grossa mole di dati e quindi la scarsa graficabilità degli stessi, sono stati considerati i dati ogni trenta secondi.

$$J = P/\Delta t \text{ [mm/min]} \tag{Eq. 7}$$

$$\rho = D/\Delta t \text{ [mm/min]} \tag{Eq. 8}$$

Sono stati costruiti quindi i grafici di intensità di pioggia e velocità di deflusso (Figura 40), in cui sono stati eliminati gli ultimi 20 minuti, questo per una maggiore chiarezza espositiva e perché entrambi i valori dopo i primi 30 minuti risultano prossimi allo zero. Inoltre la bilancia, essendo molto sensibile, anche una volta terminata la simulazione della pioggia, continua ad oscillare leggermente, per cui l'intensità calcolata non rimane costante a zero dopo i primi 10 minuti.

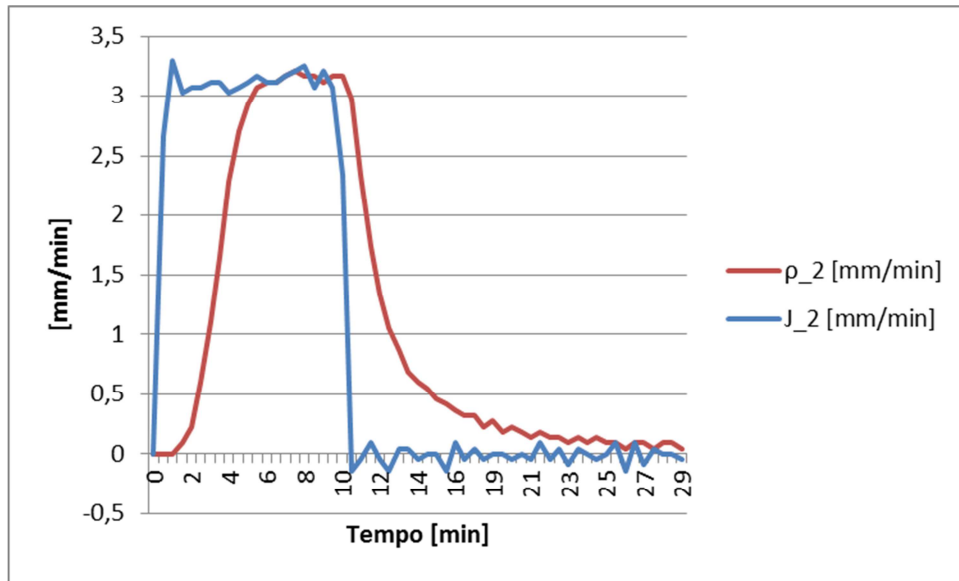


Figura 40: Intensità di pioggia (J) e velocità di deflusso (ρ) in funzione del tempo per una prova con tempo di ritorno di 30 anni

Calcolo del Curve Number

Il modello CN-SCS, proposto dal Soil Conservation Service, è un modello per la formazione del deflusso. Questo metodo assume che il volume specifico di deflusso superficiale P_e sia proporzionale alla precipitazione cumulata lorda P , a meno dell'assorbimento iniziale I_a , secondo il rapporto tra volume specifico infiltrato F e volume specifico di saturazione del terreno S .

P_e viene ricavato dall'equazione 9 e tutti i termini sono in mm.

$$P_e = (P - I_a) \frac{F}{S} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sostituendo ad F l'espressione seguente (Eq. 10) si ottiene l'equazione finale utilizzata dal metodo (Eq. 11).

$$F = P - I_a - P_e \quad (\text{Eq. 10})$$

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (\text{Eq. 11})$$

Il volume specifico di saturazione dipende dalla natura del terreno e dall'uso del suolo, che vengono qui rappresentati dal parametro CN, secondo la relazione:

$$S = S_0 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 12})$$

Dove CN è compreso teoricamente tra 0 e 100, con CN=0 quando tutta la precipitazione si infiltra e non si ha formazione di deflusso e con CN=100 quando tutta la precipitazione si trasforma in deflusso superficiale, ed S_0 è un fattore di scala pari a 254 mm.

Il parametro I_a è un volume di pioggia sottratto a priori al bilancio e descrive i processi di

- Intercettazione da parte della vegetazione
- Accumulo nelle depressioni superficiali
- Imbibimento iniziale del terreno

Il parametro CN inoltre varia in funzione di quattro diverse classificazioni: la permeabilità, dove i terreni sono suddivisi in A, B, C e D; l'uso del suolo; le condizioni di drenaggio; le condizioni iniziali di saturazione del suolo.

Di particolare interesse sono le condizioni iniziali di saturazione del suolo per cui si classifica il terreno in base all'altezza di pioggia caduta nei cinque giorni precedenti all'evento, con tre condizioni possibili: AMC-I, dove il potenziale di infiltrazione è massimo; AMC-II, ovvero un valore medio di saturazione, utilizzato come riferimento; AMC-III che rappresenta le condizioni più critiche. AMC sta per 'Antecedent Moisture Condition'.

Avendo come dati la precipitazione lorda cumulata P e il deflusso superficiale P_e è stato possibile ricavare le variabili dipendenti I_a ed S tramite l'analisi con regressione non lineare, utilizzando uno specifico programma di statistica Statgraphics, come metodo di stima di Marquardt.

Per semplificare la nomenclatura e il suo inserimento all'interno del programma sono state cambiate diciture:

- la precipitazione lorda cumulata (P) è chiamata pioggia totale (P);
- il deflusso superficiale indicato come P_e viene indicato come D ;
- l'intercettazione I_a viene semplificata in I senza il pedice

Dalle variabili dipendenti ricavate tramite regressione si è quindi potuto calcolare il CN per ogni microcosmo. Tenuto conto che, essendo il sistema in condizioni critiche di saturazione, si sono utilizzate delle formule inverse specifiche per AMC-III.

Il CN ricavato infatti non è il CN(II) corrispondente a delle condizioni medie di saturazione bensì il CN(III), corrispondente appunto a condizioni critiche.

Quindi tramite le formule inverse del metodo sono ricavati prima il CN, considerato quindi come CN(III), (Eq. 13) e poi il CN(II) del sistema (Eq. 14).

$$CN = \frac{S_0}{S + S_0} 100 \quad (\text{Eq. 13})$$

$$CN(II) = \frac{0,43 CN(III)}{1 - 0,0057 CN(III)} \quad (\text{Eq. 14})$$

I valori di CN sono stati confrontati per le diverse tipologie di microcosmo e anche a seconda dei diversi componenti del sistema. Le differenze di CN dovute ai componenti del sistema sono state analizzate con il test non parametrico di Kruskal-Wallis, in quanto non presentavano una distribuzione normale.

3.4.3 Vegetazione

Prima di ogni prova è stata fatta una foto alla vegetazione del microcosmo per poterne analizzare la percentuale di copertura.

Le foto sono state elaborate con un programma di grafica (Photoshop) per eliminare le distorsioni della foto e quindi selezionare solo le zone coperte da vegetazione eliminando il terreno nudo (Figura 41).



Figura 41: Esempio di elaborazione grafica di una foto di copertura in questo caso di un microcosmo ad erbacee perenni

Le foto così elaborate sono state poi analizzate con MatLab che ha determinato, impostando una soglia di selezione, tramite la conta dei pixel dell'immagine, le percentuali di copertura, espresse come 'canopy closure' e 'canopy cover'. Un esempio dell'output del programma si ha in Figura 42. Nelle analisi dei dati sono stati considerati i valori di 'canopy closure' in quanto più accurati e realistici.

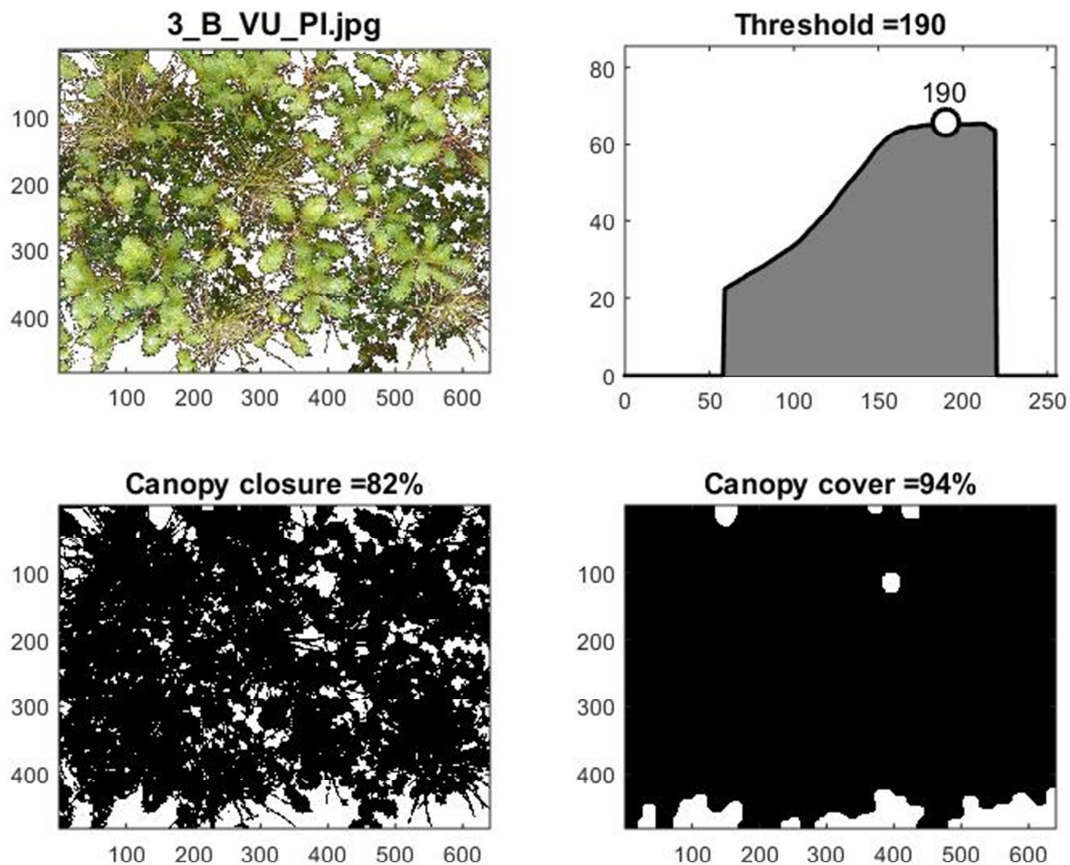


Figura 42: Esempio di elaborazione delle foto per ricavare le percentuali di copertura

Alla fine di tutte le prove la vegetazione è stata tagliata ed è stata pesata per poi essere essiccata in stufa ad una temperatura di 105°C per 24 ore ed essere ripesata da secca.

Una volta ottenuti anche i pesi della vegetazione è stato possibile calcolare l'effettiva capacità di ritenzione idrica dei sistemi, comprendendo anche l'effetto della vegetazione.

Capacità di ritenzione idrica

Quindi è stata ricavata la quantità d'acqua contenuta nel sistema prima dell'inizio della simulazione di pioggia, dopo averla lasciata sgrondare per 2 ore dall'immersione, in modo che non producesse più deflusso. Nel calcolo è stato considerato il peso a secco di tutti i componenti del sistema ed è quindi stata considerata anche la quantità d'acqua immagazzinata nei tessuti delle piante.

Il peso complessivo del sistema secco comprende, sommati per le varie composizioni:

- Substrato
 - Vulcanico
 - Laterizio

- Strato filtrante
- Componenti Perlite (PI)
 - Sacco di perlite
 - Georete protettiva
- Componenti Profilo termoformato (BA)
 - Profilo termoformato
 - Fibra di poliestere e polipropilene protettiva
- Componenti della struttura
 - Struttura di sostegno
 - Cassetta
 - Supporti della cassetta
 - Tubo scarico

In questo modo è stata determinata la capacità di ritenzione idrica di ogni microcosmo, WRC_1 (Eq. 15).

$$WRC_1 = \text{Peso iniziale del sistema} - \text{Peso complessivo del sistema secco} \quad (\text{Eq. 15})$$

La capacità di ritenzione idrica, in inglese water retention capacity (WRC), è la quantità d'acqua massima che il sistema può trattenere senza che ci sia deflusso libero (Bengtson et al. 2005). Finché le condizioni di umidità sono al di sotto della capacità di ritenzione idrica è difficile infatti che ci sia deflusso mentre tendenzialmente nel momento in cui questa è raggiunta il deflusso ha inizio (Bengtson et al. 2005).

La capacità di ritenzione idrica nonché le condizioni di umidità precedenti sono quindi le variabili da cui dipendono le performance di un sistema di tetto verde nel dilazionare il deflusso durante eventi di pioggia intensi (Fioretti et al. 2010; Stovin 2010).

Comunque una maggiore quantità d'acqua è immagazzinata dal sistema durante l'evento di pioggia, in più a quella trattenuta a capacità di ritenzione idrica. Dal momento in cui finisce la precipitazione questa è drenata grazie alla forza di gravità (Bengtson et al. 2005).

Questo ulteriore quantitativo di acqua immagazzinata può essere definito come uno storage temporaneo (*detention*) che si verifica nel sistema grazie alla resistenza che offrono i macropori alla percolazione dell'acqua, i quali invece non contribuiscono alla capacità di ritenzione idrica (Vesuviano et al. 2013; Yio et al. 2013).

Quindi, considerando il peso massimo raggiunto dal sistema, è stata calcolata anche la massima quantità d'acqua accumulabile, WRC_2 (Eq. 16). Mentre il valore dello storage temporaneo, chiamato

acqua gravitazionale, ovvero la frazione di precipitazione trattenuta dal sistema durante l'evento di pioggia, è ottenuto sottraendo le due WRC (Eq. 17).

$$WRC_2 = \text{Peso massimo del sistema} - \text{Peso complessivo del sistema secco} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\text{Acqua gravitazionale} = WRC_2 - WRC_1 \quad (\text{Eq. 17})$$

I valori di capacità di ritenzione idrica e di acqua gravitazionale sono stati confrontati per le diverse tipologie di microcosmo e anche a seconda dei diversi componenti del sistema. Le differenze dovute ai componenti del sistema sono state analizzate con il test non parametrico di Kruskal-Wallis, in quanto i dati non presentavano una distribuzione normale.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Analisi dei dati raccolti

4.1.1 Simulatore di pioggia

La taratura del simulatore ha permesso di ottenere le pressioni di funzionamento della pompa per far raggiungere al sistema la portata voluta in modo da simulare correttamente le due intensità di precipitazione (1,68 mm/min e 3,02 mm/min) nei 10 minuti totali di ogni prova. I valori sono riportati in Tabella 8.

Tabella 8: Pressione di esercizio della pompa ottenuta dalla taratura del simulatore per i tempi di ritorno e la pioggia totale caduta in 10 minuti

Tempo di ritorno [anni]	2 anni	30 anni
Pioggia totale in 10' [mm]	16,8	30,2
Pressione di esercizio della pompa [bar]	4,4	4,9

Dai dati registrati delle tarature sono stati costruiti due grafici di precipitazione e tempo, uno per il tempo di ritorno di 2 anni in Figura 43 ed uno per quello di 30 anni in Figura 44; in entrambi i grafici si rileva la perfetta linearità della simulazione, per tutte e sei le prove con R^2 tendente ad 1.

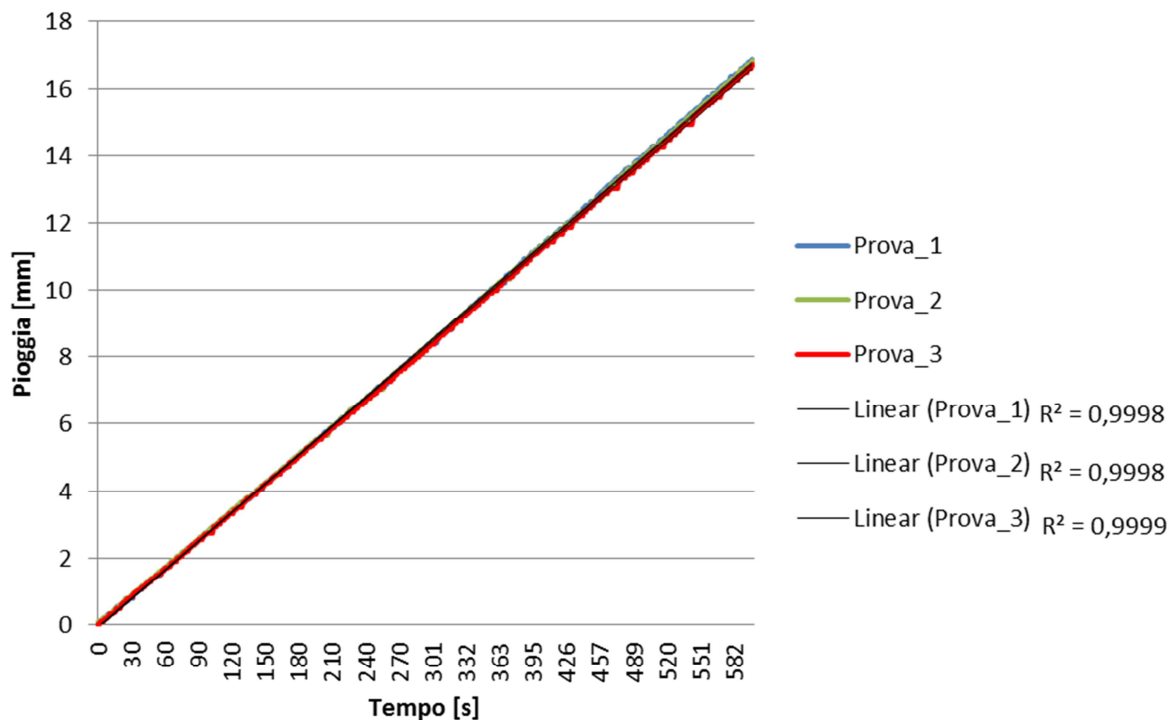


Figura 43: Taratura del simulatore per il tempo di ritorno di 2 anni

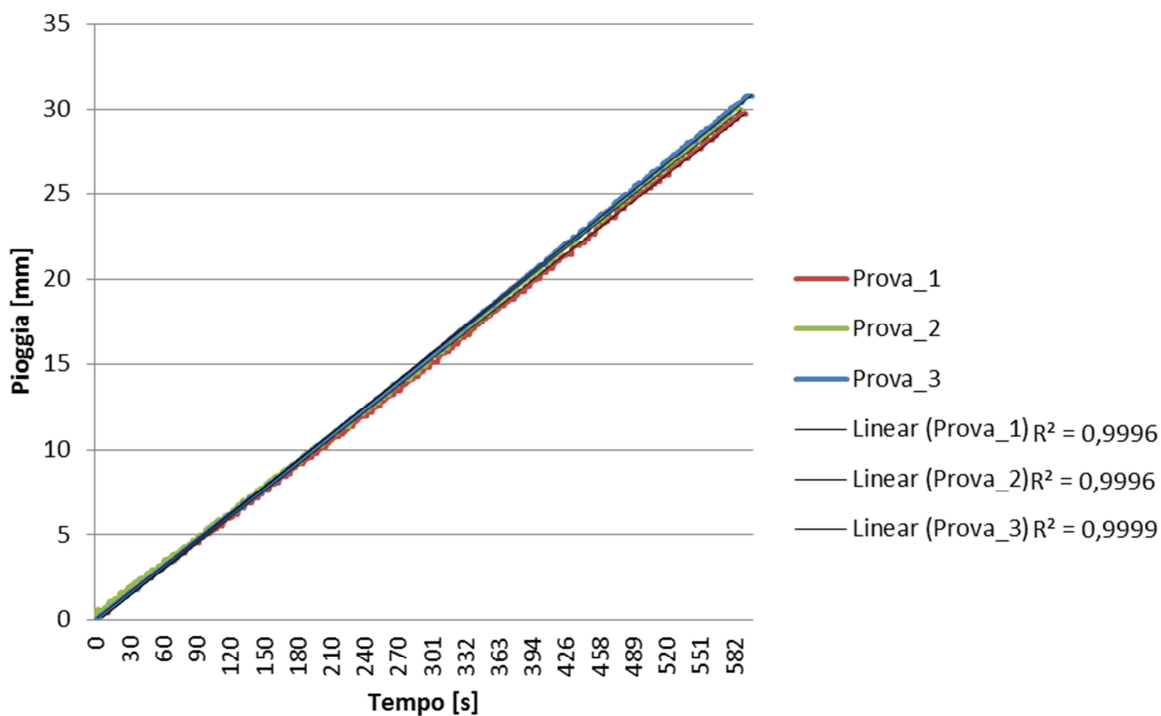


Figura 44: Taratura del simulatore per il tempo di ritorno di 30 anni

Soddisfacenti sono anche i valori del coefficiente di uniformità di Christiansen per la distribuzione di pioggia all'interno del microcosmo, riportati in Tabella 9. Per la simulazione dell'intensità di pioggia con tempo di ritorno di 2 anni la media delle tre prove ha un coefficiente maggiore di 70 mentre la simulazione con tempo di ritorno di 30 anni ha un coefficiente maggiore di 90 e dunque considerabile

come un'ottima distribuzione di pioggia (il coefficiente è considerato molto buono quando supera l'80%).

Tabella 9: Coefficienti di uniformità di Christiansen C_u per le diverse prove e i rispettivi tempi di ritorno

Tempo di ritorno	Prova	C_u
2 anni	Prova 1	67,73
	Prova 2	64,96
	Prova 3	67,41
	Media	70,61
30 anni	Prova 1	89,31
	Prova 2	89,51
	Prova 3	78,80
	Media	90,35

Sono quindi stati realizzati anche dei raster delle distribuzioni di pioggia, per avere una visualizzazione grafica della distribuzione delle quantità d'acqua all'interno della cassetta di microcosmo. Le celle più chiare rappresentano quelle con una minore quantità d'acqua precipitata mentre quelle di un blu più scuro indicano le zone dove è precipitata una maggiore quantità di acqua. Anche graficamente si può vedere come poche celle presentino elevati volumi d'acqua, nel caso del tempo di ritorno 2 anni (Figura 45) solo 4 celle presentano dei valori nettamente superiori agli altri mentre nel caso di quello di 30 anni (Figura 46) le differenze sono meno visibili, e lo stesso avviene per le celle dove sono presenti scarsi volumi d'acqua.

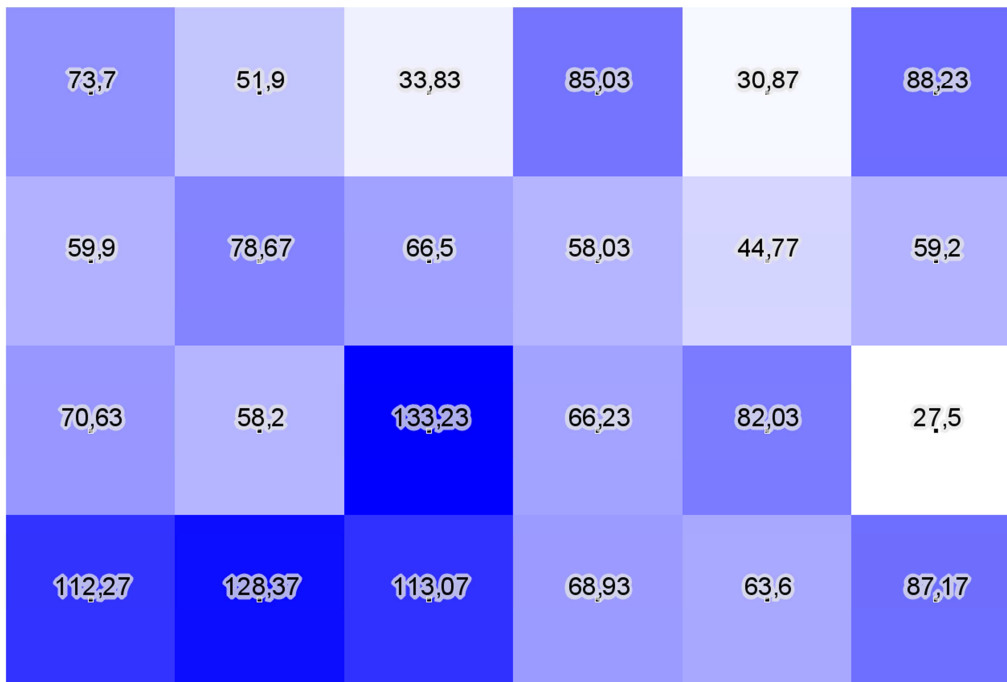


Figura 45: Distribuzione della pioggia per la simulazione con tempo di ritorno di 2 anni

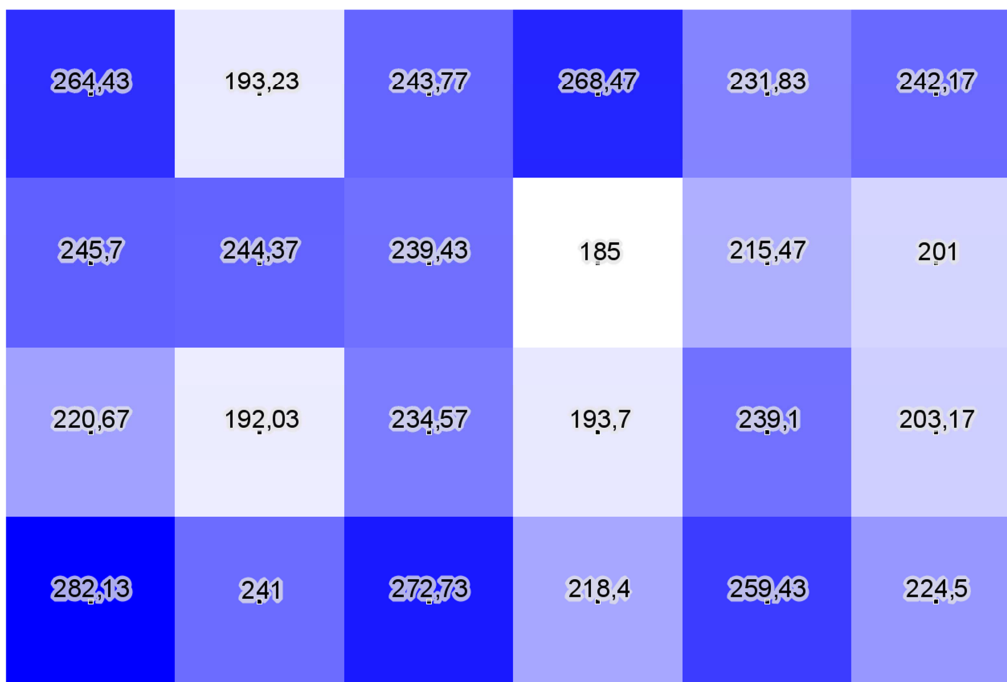


Figura 46: Distribuzione della pioggia per la simulazione con tempo di ritorno di 2 anni

Questo per quanto riguarda il funzionamento del simulatore di pioggia.

Nei paragrafi successivi si andrà invece ad analizzare quanto più interessa effettivamente al lavoro di tesi, ovvero il comportamento idrologico dei microcosmi, facendo un'analisi e un confronto tra i vari sistemi e componenti e cercando poi di inquadrarli in un contesto più ampio, cercando di confrontarli con i dati ricavati dalle precedenti sperimentazioni solo sui substrati e i sistemi di accumulo, per cercare almeno in parte di individuare il ruolo che può avere la vegetazione nel mitigare il deflusso, e con dati di letteratura di studi analoghi per confrontarne le performance.

4.1.2 Comportamento idrologico dei microcosmi

Grafici di pioggia accumulata e drenata

Innanzitutto si è proceduto analizzando per primi i grafici di pioggia accumulata e drenata che sono stati raggruppati secondo la tipologia di substrato e strato di accumulo e drenaggio in modo da poter confrontare gli effetti della vegetazione per lo stesso sistema e poter agevolmente confrontare tra loro le combinazioni tra il substrato e il drenante.

Poiché riportare i grafici di tutte le prove sarebbe risultato poco chiaro ed estremamente caotico si è preferito riportare i grafici dei valori medi per le tre prove per tempo di ritorno in modo da avere solo una curva per tempo di ritorno per campione.

Nei grafici seguenti in legenda sono segnati il numero di campione assieme a S, ad indicare la pioggia accumulata per quel campione, e D, ad indicare la pioggia drenata. Per poter distinguere i miscugli di vegetazione vi è una legenda comune a tutti i grafici, visibile in Figura 47, dove i miscugli si distinguono dai colori utilizzati, in verde il Sedum, in blu le erbacee perenni e in grigio le suffruticose.

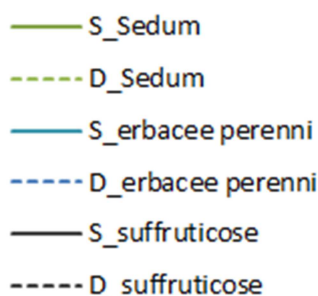


Figura 47: Legenda per distinguere i miscugli di vegetazione nei grafici di pioggia accumulata e drenata

Per i sistemi con substrato Vulcanico e drenante Perlite, si nota come la ritenuta idrica maggiore, per l'evento di pioggia con tempo di ritorno di 2 anni (Figura 48), sia raggiunta dal sistema con Sedum, che trattiene come massimo 9,8 mm di pioggia, ovvero il 58,2% della pioggia totale. A seguire vi è il sistema con il miscuglio di suffruticose che trattiene comunque più del 50% della precipitazione e in ultimo c'è il sistema con erbacee perenni che ne trattiene il 42%, con una differenza del 16% rispetto al Sedum (Tabella 10).

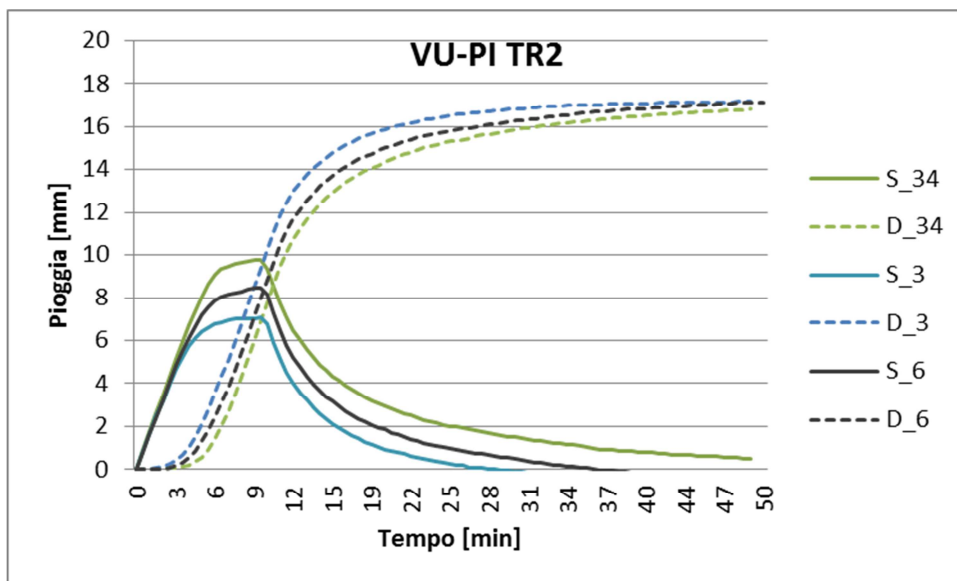


Figura 48: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 2 anni per sistema con Vulcanico e Perlite e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 34, 3, 6

Per il tempo di ritorno di 30 anni (Figura 49) invece le differenze tra i sistemi con diversi miscugli si riducono notevolmente e le performance si allineano, anche se si nota sempre una differenza in difetto del miscuglio erbaceo, che si discosta dal Sedum del 7,7%.

Si evidenzia come con un'intensità di pioggia maggiore le percentuali di acqua accumulata dal sistema durante l'evento di pioggia siano decisamente inferiori rispetto alle simulazioni con intensità minore, con un massimo per il sistema con Sedum del 39,6%.

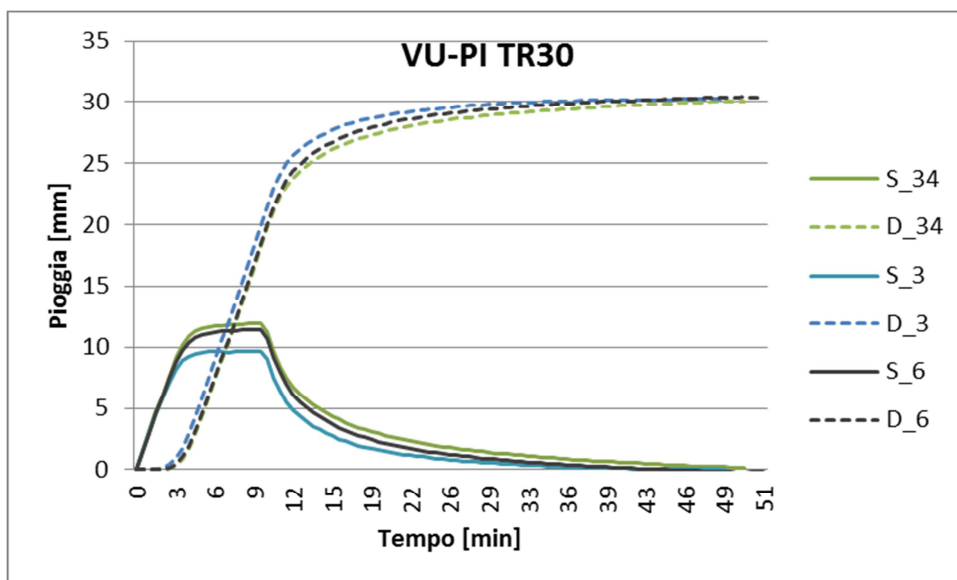


Figura 49: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 30 anni per sistema con Vulcanico e Perlite e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 34, 3, 6

In Tabella 10 sono riportati i valori massimi di pioggia accumulata per ogni campione con combinazione VU-PI per i rispettivi tempi di ritorno e le percentuali di copertura della vegetazione. Si nota come alla percentuale di copertura maggiore non corrispondano i valori di trattenuta idrica più

elevati. Infatti nonostante la percentuale di copertura maggiore ce l'abbia il microcosmo con erbacee perenni il sistema con maggiore ritenuta idrica è comunque quello con Sedum ed anzi il sistema con erbacee perenni è il peggiore di questa serie.

Tabella 10: Valori massimi di pioggia accumulata per combinazioni VU-PI per i due tempi di ritorno

Campione	Tempo di ritorno di 2 anni		Tempo di ritorno di 30 anni		Copertura vegetale
	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[%]
34 A VU PI	9,8	58,2	12,0	39,6	75,1
3 B VU PI	7,1	42,2	9,6	31,9	81,7
6 C VU PI	8,5	50,4	11,5	38,0	73,7

Per quanto riguarda invece le combinazioni con substrato Vulcanico e come drenante il Profilo termoformato, il sistema che trattiene più pioggia nella simulazione con tempo di ritorno di 2 anni (Figura 50) è quello con il miscuglio di suffruticose, con il 79% di acqua accumulata, mentre più o meno alla pari sono i sistemi con erbacee perenni e Sedum, entrambi comunque sopra al 60% di acqua accumulata.

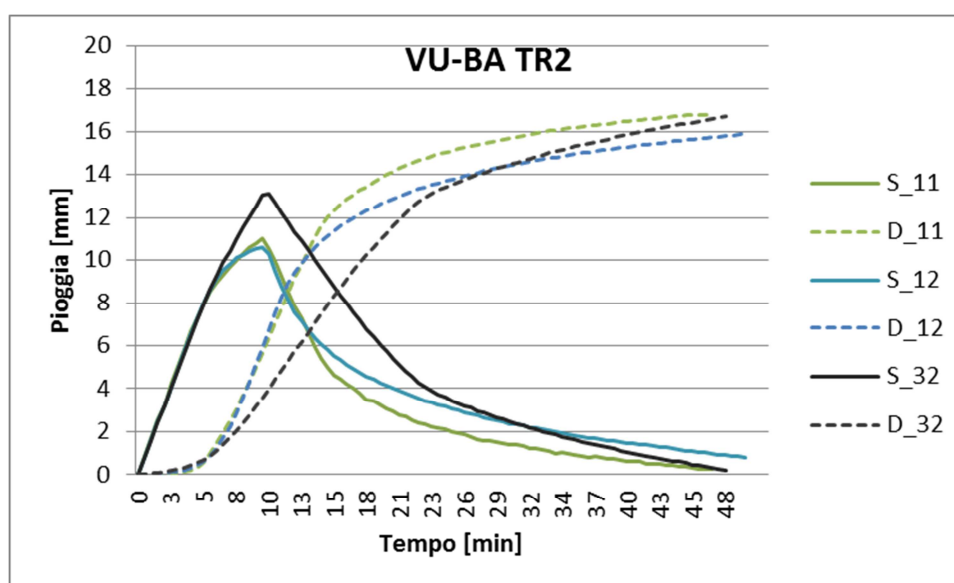


Figura 50: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 2 anni per sistema con Vulcanico e Profilo termoformato e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 11, 12, 32

Per la simulazione con tempo di ritorno di 30 anni (Figura 51) vi è un peggioramento da parte del sistema con erbacee perenni che non aumenta di molto la trattenuta idrica rispetto alla simulazione di minore intensità di pioggia, trattenendo solo 3 mm di pioggia in più rispetto a prima.

Diverso è invece il comportamento degli altri due sistemi, che mantengono, nonostante l'aumento di pioggia, praticamente le medesime percentuali di trattenuta, 80% per il sistema con suffruticose e 64% per quello a Sedum.

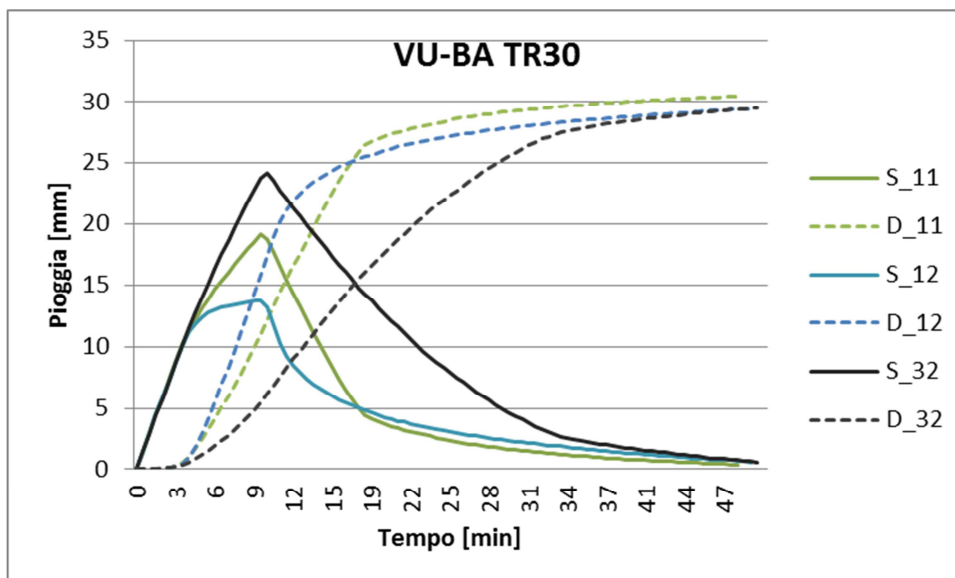


Figura 51: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 30 anni per sistema con Vulcanico e Profilo termoformato e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 11, 12, 32

In Tabella 11 sono riportati i valori massimi di pioggia accumulata, in mm e in percentuale, e le percentuali di copertura della vegetazione; come si può notare le differenze, in particolar modo per il tempo di ritorno di 30 anni, sono elevate, con il miscuglio a suffruticose che accumula il 35% di pioggia in più del miscuglio ad erbacee perenni. Anche in questo caso le percentuali di copertura non risultano determinanti per le quantità d’acqua trattene in quanto il sistema con minore copertura è anche quello con maggiore acqua immagazzinata.

Tabella 11: Valori massimi di pioggia accumulata per combinazioni VU-BA per i due tempi di ritorno

Campione	Tempo di ritorno di 2 anni		Tempo di ritorno di 30 anni		Copertura vegetale
	[mm]	[%]	[mm]	[%]	
11 A VU BA	11,1	66,1	19,4	64,2	83,0
12 B VU BA	10,7	63,5	13,8	45,6	60,2
32 C VU BA	13,3	79,0	24,4	80,8	51,7

Anche nel caso delle combinazioni con substrato Laterizio e come drenante la perlite, come per la combinazione Vulcanico-Perlite, nelle simulazioni con tempo di ritorno di 2 anni (Figura 52) il sistema con Sedum risulta trattenere più pioggia (45,5%) ma la differenza tra i sistemi con miscuglio di erbacee e di suffruticose è minore, anzi il sistema con erbacee ha valori di trattenuta leggermente più elevati, con il 34,7% di trattenuta rispetto al 32% del sistema a suffruticose.

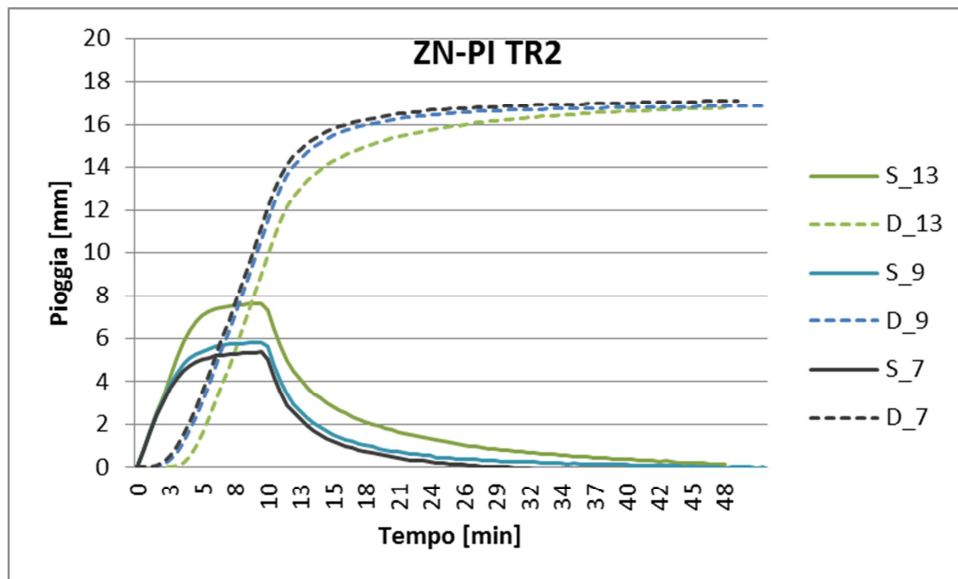


Figura 52: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 2 anni per sistema con Laterizio e Perlite e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 13, 9, 7

Per quanto riguarda le simulazioni con tempo di ritorno di 30 anni invece le performance dei sistemi diminuiscono (Figura 53). Il sistema con Sedum, che con tempo di ritorno di 2 anni si discostava notevolmente, si avvicina di più al comportamento degli altri due; infatti se prima vi era una differenza del 13,5% con il sistema più scarso, in questo caso è solo del 5,5%.

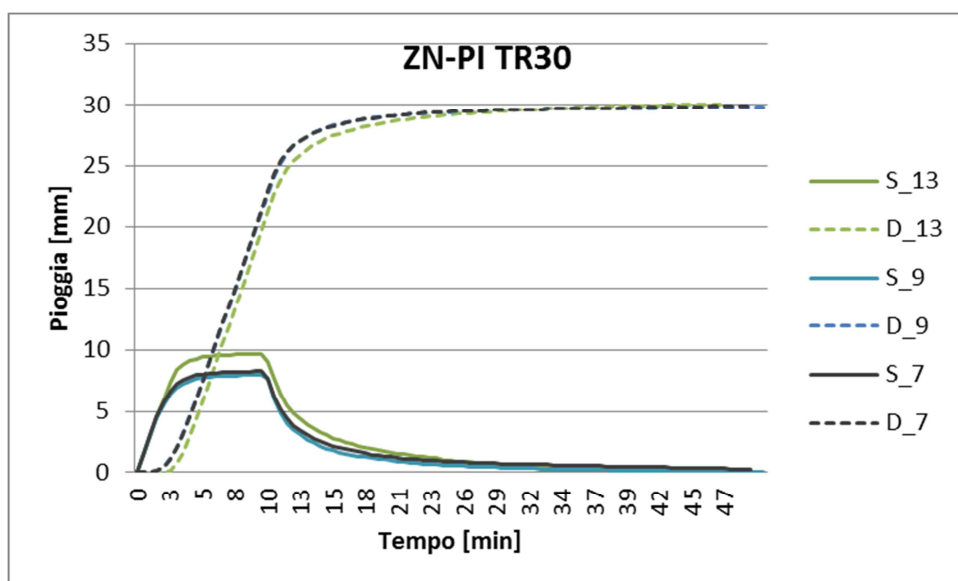


Figura 53: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 30 anni per sistema con Laterizio e Perlite e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 13, 9, 7

Si può notare anche in questo caso, come nelle combinazioni Vulcanico-Perlite, che le percentuali di trattenuta per le simulazioni con tempo di ritorno di 30 anni sono inferiori rispetto a quelle con tempo di ritorno di 2 anni, anche se le differenze sono meno notevoli. I dati dei valori massimi di pioggia accumulata, in mm e in percentuale, e le percentuali di copertura della vegetazione sono

riportati in Tabella 12. Come nei casi precedenti anche in questo la percentuale di copertura non fa la differenza.

Tabella 12: Valori massimi di pioggia accumulata per combinazioni ZN-PI per i due tempi di ritorno

Campione	Tempo di ritorno di 2 anni		Tempo di ritorno di 30 anni		Copertura vegetale
	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[%]
13 A ZN PI	7,6	45,5	9,7	32,0	79,7
9 B ZN PI	5,8	34,7	8,0	26,5	94,1
7 C ZN PI	5,4	32,0	8,3	27,4	70,8

Nel caso dell'ultima combinazione, ovvero substrato Laterizio e come drenante il Profilo termoformato, per le simulazioni con tempo di ritorno di 2 anni (Figura 54) il sistema con le performance migliori è quello con miscuglio di erbacee perenni, con il 73,4% di acqua trattenuta, in contrasto con gli altri due sistemi che hanno percentuali di acqua trattenuta del 51%, comportandosi in modo simile.

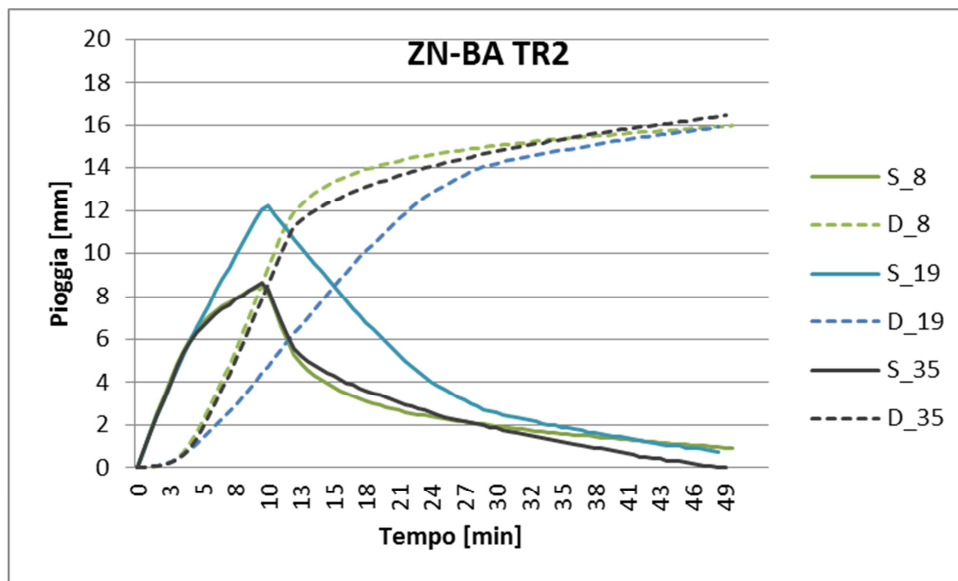


Figura 54: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 2 anni per sistema con Laterizio e Profilo termoformato e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 8, 19, 35

Nella simulazione con tempo di ritorno di 30 anni (Figura 55) invece il sistema con miscuglio a suffruticose si distingue da quello con Sedum, poiché quest'ultimo non migliora le proprie prestazioni rispetto al tempo di ritorno di 2 anni e anzi le peggiora leggermente, passando dal 51% di acqua trattenuta ad un 47%. Il sistema migliore risulta essere sempre quello con erbacee perenni, con una percentuale di acqua trattenuta del 76,4%. Il sistema però che ha un più elevato incremento delle proprie performance è quello con suffruticose, che passa dal 51,6% al 60% di acqua trattenuta, con un aumento dell'8,4%.

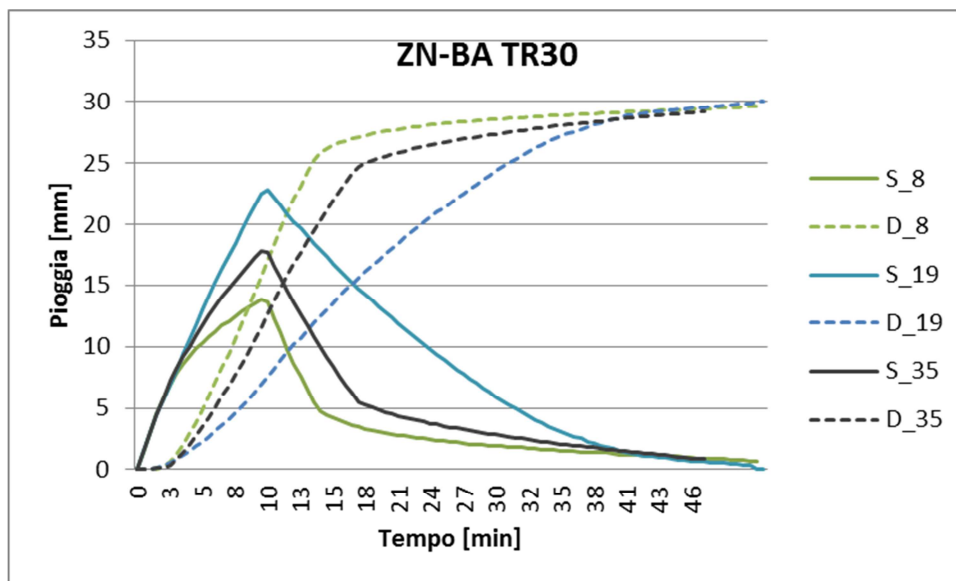


Figura 55: Pioggia accumulata (S) e drenata (D) con Tempo di ritorno di 30 anni per sistema con Laterizio e Profilo termoformato e i tre diversi miscugli di vegetazione, campioni 8, 19, 35

I valori massimi di pioggia accumulata, in mm e in percentuale, e le percentuali di copertura della vegetazione sono riportati in Tabella 13.

Anche in questo caso si può notare come i valori di pioggia accumulata varino parecchio tra un sistema e l'altro, come nel caso della combinazione Vulcanico-Profilo termoformato; dunque presumibilmente, oltre al tipo di vegetazione, è il profilo termoformato che fa la differenza.

Tabella 13: Valori massimi di pioggia accumulata per combinazioni ZN-BA per i due tempi di ritorno

Campione	Tempo di ritorno di 2 anni		Tempo di ritorno di 30 anni		Copertura vegetale
	[mm]	[%]	[mm]	[%]	
8 A ZN BA	8,6	51,0	14,2	47,0	87,4
19 B ZN BA	12,3	73,4	23,1	76,4	74,7
35 C ZN BA	8,7	51,6	18,1	60,0	69,6

Facendo un confronto tra sistemi con lo stesso drenante e diversi substrati, si può notare come con drenante Perlite il miscuglio di vegetazione migliore sia quello con Sedum, anche se le differenze con gli altri miscugli diminuiscono nel caso di pioggia con maggiore intensità (tempo di ritorno 30 anni).

Per quanto riguarda il substrato invece, sempre mantenendo la Perlite come drenante, quello che trattiene più acqua è il Vulcanico rispetto al Laterizio, con una differenza notevole per la pioggia con tempo di ritorno di 2 anni, media del 13%, mentre meno evidente con tempo di ritorno di 30 anni, media dell'8%.

Guardando invece i sistemi con drenante Profilo termoformato si può notare come immagazzinino molta più acqua dei sistemi con Perlite e inoltre abbiano un comportamento e delle tempistiche di

drenaggio abbastanza diversi. In questo caso non vi è un miscuglio che predomina, come nel caso dei sistemi con Perlite, ma, con substrato Vulcanico, le performance migliorano con il miscuglio a suffruticose mentre, con il Laterizio, è migliore il miscuglio ad erbacee.

Tendenzialmente i sistemi con Profilo termoformato trattengono maggiore acqua nella fase di pioggia e il drenaggio è maggiormente traslato nel tempo.

I sistemi con Perlite invece hanno dei picchi di accumulo molto meno marcati dei precedenti e il deflusso è più costante.

Si nota in ogni caso come non sia la percentuale di copertura ad influire in particolar modo sulla quantità d'acqua trattenuta.

Si nota come le combinazioni che contengono la Perlite abbiano, indipendentemente dai valori, lo stesso andamento della curva di pioggia accumulata che oltretutto è più definito e ricorrente. Quando nella combinazione è presente lo strato di accumulo e protezione del Profilo termoformato i grafici invece hanno andamenti più irregolari e variabili, questo indipendentemente dal substrato utilizzato.

Un esempio si ha in Figura 56, i valori rappresentati sono dei campioni con combinazione di substrato Laterizio e drenante Perlite e si può notare come gli andamenti siano pressochè uguali. In Figura 57 invece sono rappresentate le curve dei campioni sempre con substrato Laterizio ma drenante Profilo termoformato e si può notare come abbiano andamenti abbastanza diversi tra loro e una maggiore variabilità.

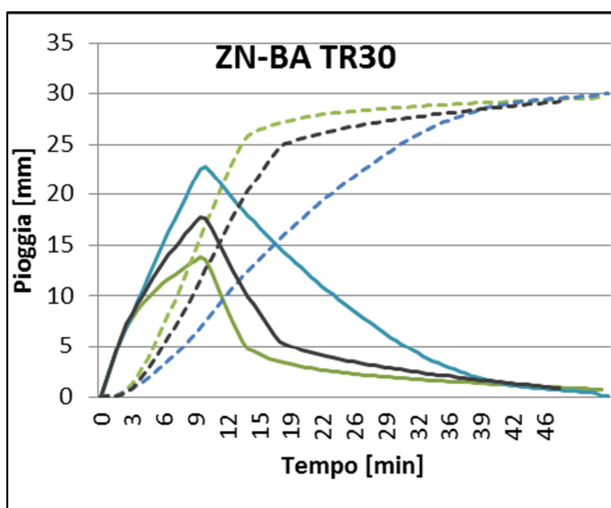


Figura 56: Pioggia accumulata e drenata per tre campioni con ZN-PI e diversi miscugli di vegetazione, si nota l'andamento molto simile tra tutte le curve

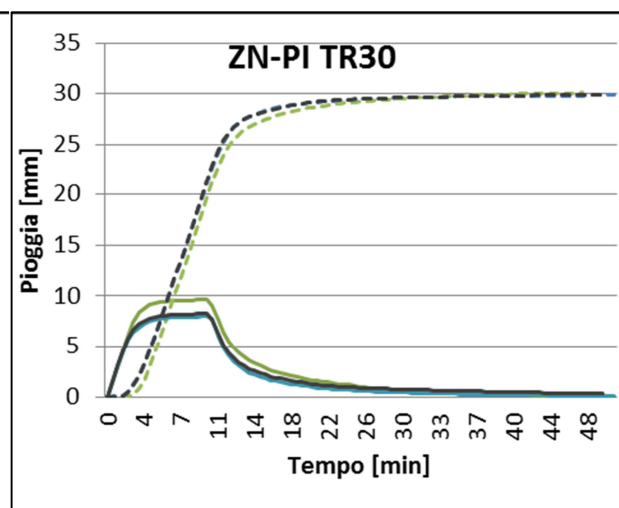


Figura 57: Pioggia accumulata e drenata per tre campioni con ZN-BA e diversi miscugli di vegetazione, si nota l'andamento abbastanza diverso tra le curve

Si può notare come i campioni con drenante perlite ad un certo punto raggiungano la massima capacità di accumulo di acqua di pioggia e quindi il loro volume di saturazione, mentre questo non accade per i campioni con drenante profilo termoformato, i quali non sembrano raggiungere alcun volume di saturazione, continuando ad immagazzinare acqua.

Un comportamento così diverso può trovare giustificazione nel fatto che il drenante profilo termoformato sia abbinato allo strato di protezione costituito da fibra di polietilene e polipropilene, che molto probabilmente in alcuni casi, ad esempio il campione 19 e il 32, è andato ad ostruire parzialmente il foro di scarico del sistema, falsando in questo modo i dati di accumulo e drenaggio.

Grafici di intensità di pioggia e velocità di deflusso

Passando ad analizzare i grafici di intensità di pioggia e velocità di drenaggio, si può notare che, al di là del fatto che l'intensità di pioggia come volevasi è molto simile per tutte le prove, la velocità di drenaggio è abbastanza variabile tra i microcosmi.

Nei sistemi con drenante Perlite le velocità di drenaggio sono molto simili e questo lo si può chiaramente notare confrontando i grafici di Figura 58 e Figura 60, in cui sia i valori massimi che gli andamenti si somigliano.

Nel caso della composizione con substrato Vulcanico e drenante Perlite si nota come, nella simulazione con tempo di ritorno di 2 anni (Figura 58), il sistema con la vegetazione erbacea faccia iniziare prima il deflusso, raggiungendo anche prima il picco di velocità, mentre quello con Sedum riesca a traslarlo leggermente. Si può notare come il deflusso sia comunque ben dilazionato da tutti e tre i sistemi in quanto il picco massimo di velocità di deflusso si ha alla fine della simulazione di pioggia.

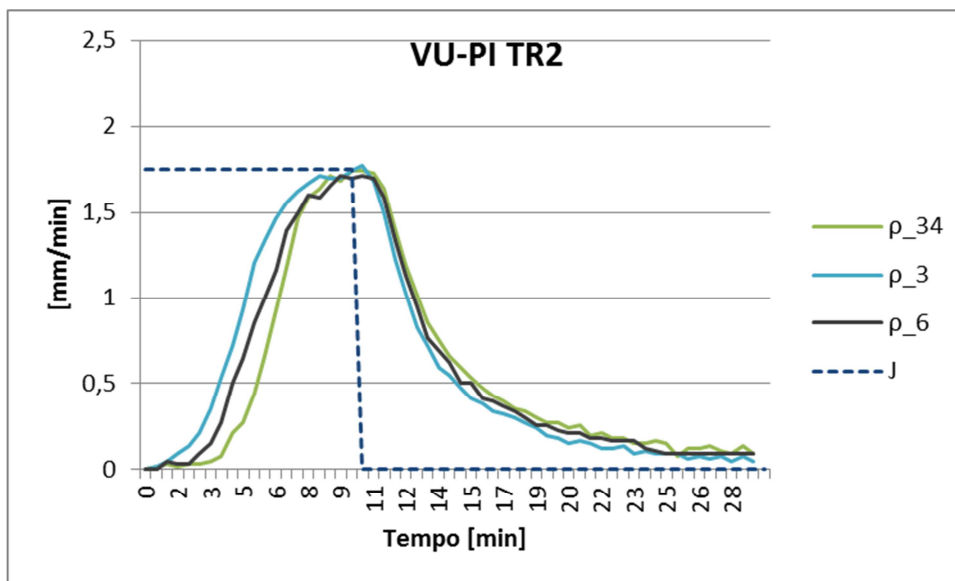


Figura 58: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 2 anni per sistemi Vulcanico e Perlite, campioni 34, 3, 6

In Tabella 14 sono riportati i dati della velocità di deflusso massima raggiunta in un dato tempo dai sistemi e della velocità di deflusso media durante la fase di carico, ovvero nella fase in cui il deflusso aumenta, e durante la fase di scarico, ovvero quando inizia a diminuire non essendoci più apporto di acqua.

I valori dimostrano come, considerando in particolare le velocità di deflusso durante il carico, non venga raggiunta l'intensità di pioggia media, ad indicare che i sistemi sono efficaci nel loro effetto di laminazione dell'evento.

Nel caso del tempo di ritorno di 2 anni come si vede anche graficamente il sistema più efficace è quello con miscuglio di Sedum, che ha la velocità media di deflusso in fase di carico più bassa, seguito dal sistema con suffruticose e poi dalle erbacee. In ogni caso la velocità media di carico è inferiore all'intensità di pioggia di 0,7 mm/min per il sistema con velocità di deflusso maggiore.

Tabella 14: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 2 anni per combinazioni VU-PI

Campione	Tempo di ritorno di 2 anni				
	Tempo [min]	ρ max [mm/min]	ρ carico [mm/min]	ρ scarico [mm/min]	J [mm/min]
34 A VU PI	9,50	1,74	0,72	0,26	1,75
3 B VU PI	10,19	1,77	1,03	0,19	1,73
6 C VU PI	10,23	1,71	0,88	0,22	1,73

Per quanto riguarda le simulazioni con tempo di ritorno di 30 anni (Figura 59) invece i tre sistemi hanno dei comportamenti molto più simili e nessuno si distingue particolarmente. La velocità di

deflusso raggiunge più rapidamente il picco massimo e tutti e tre i sistemi dopo circa 5 minuti dall'inizio della simulazione di pioggia quasi raggiungono il valore medio di intensità di pioggia.

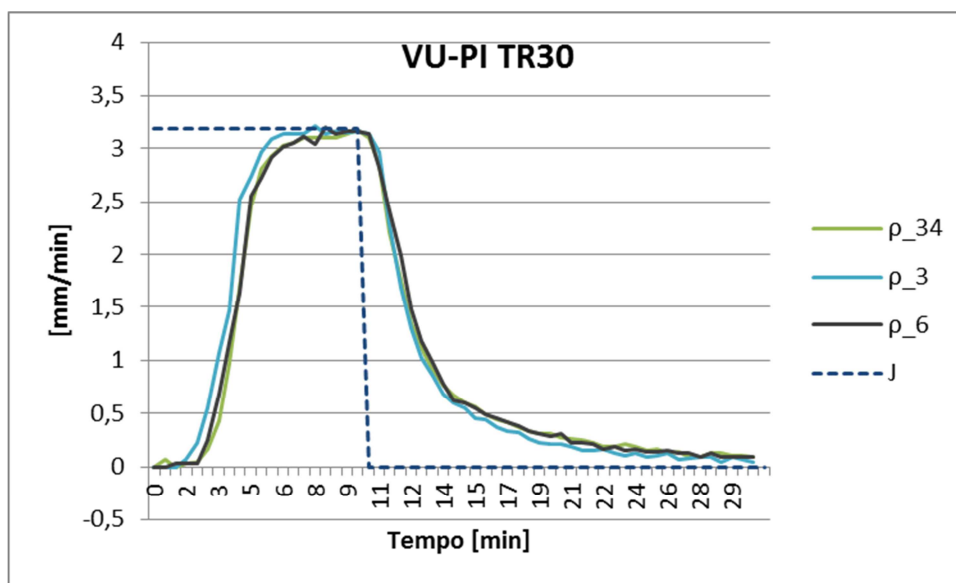


Figura 59: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 30 anni per sistemi Vulcanico e Perlite, campioni 34, 3, 6

Infatti la differenza di velocità media in fase di carico tra il sistema migliore, quello con Sedum, e il sistema peggiore, quello con erbacee, è di 0,18 mm/min, in contrasto con 0,31 mm/min della simulazione con tempo di ritorno di 2 anni. Tuttavia le velocità medie di deflusso rimangono, come ben visibile in Tabella 15, nettamente al di sotto dell'intensità media di pioggia, garantendo comunque un effetto di laminazione dell'acqua, per quanto minore rispetto al tempo di ritorno di 2 anni.

Sia per il tempo di ritorno di 2 anni che per quello di 30 comunque il sistema con le performance migliori è quello con i Sedum.

Tabella 15: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 30 anni per combinazioni VU-PI

Campione	Tempo di ritorno di 30 anni				
	Tempo [min]	ρ max [mm/min]	ρ carico [mm/min]	ρ scarico [mm/min]	J [mm/min]
34 A VU PI	9,50	3,18	1,92	0,32	3,18
3 B VU PI	7,62	3,21	2,10	0,29	3,11
6 C VU PI	8,16	3,19	1,94	0,32	3,15

Allo stesso modo per le combinazioni di substrato Laterizio e drenante Perlite nella simulazione con tempo di ritorno di 2 anni (Figura 60) il Sedum si distacca dagli altri, ritardando l'inizio del deflusso,

ma non c'è alcuna differenza notevole tra erbacee e suffrutuose. Le velocità di deflusso dei tre sistemi cominciano a raggiungere i valori massimi a circa 8 minuti dall'inizio della simulazione.

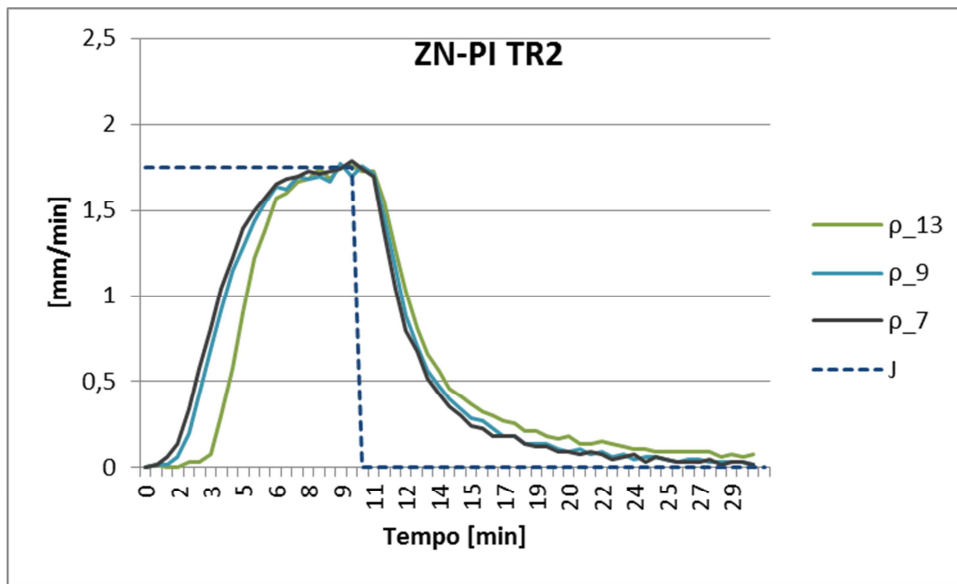


Figura 60: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 2 anni per sistemi Laterizio e Perlite, campioni 13, 9, 7

Infatti il sistema con Sedum, per quanto sia il primo a raggiungere il picco di velocità di deflusso, ha la velocità di drenaggio in fase di carico minore, mentre gli altri due sistemi sono assimilabili in quanto i valori sono molto simili, come ben visibile dalla Tabella 16. Inoltre l'inizio del deflusso è molto traslato, a circa 2 minuti dall'inizio della simulazione di pioggia. La velocità media di carico è inferiore all'intensità di pioggia di 0,56 mm/min per il sistema con velocità di deflusso maggiore. La combinazione con substrato Vulcanico perlite ha invece velocità minori.

Tabella 16: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 2 anni per combinazioni ZN-PI

Campione	Tempo di ritorno di 2 anni				
	Tempo [min]	ρ max [mm/min]	ρ carico [mm/min]	ρ scarico [mm/min]	J [mm/min]
13 A ZN PI	9,00	1,76	0,99	0,20	1,75
9 B ZN PI	9,14	1,77	1,12	0,16	1,73
7 C ZN PI	9,69	1,79	1,18	0,16	1,74

Con tempo di ritorno di 30 anni (Figura 61) il Sedum continua a mantenere questa caratteristica. La differenza con il tempo di ritorno di 2 anni sta nel fatto che i picchi di velocità vengono raggiunti prima e anzi la velocità rimane pressochè costante per tutti e tre i sistemi circa dopo i primi 5 minuti di pioggia, come per le combinazioni Vulcanico-Perlite.

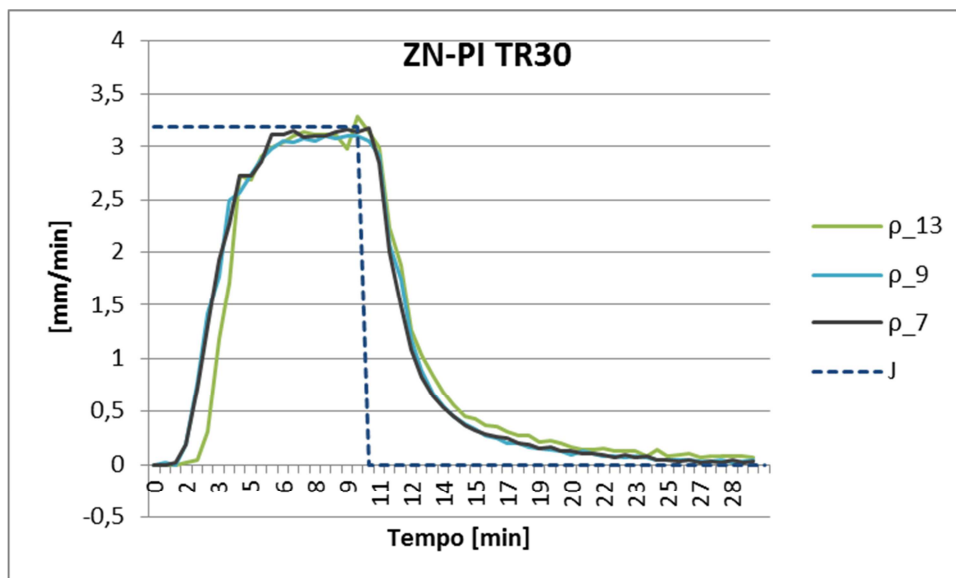


Figura 61: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 30 anni per sistemi Laterizio e Perlite, campioni 13, 9, 7

Le velocità di deflusso in fase di carico (Tabella 17) sono tuttavia maggiori rispetto alle combinazioni Vulcanico-Perlite, di cui solo quella con miscuglio erbaceo superava i 2 mm/min. In ogni caso i valori rimangono più bassi del valore medio di intensità di pioggia.

Tabella 17: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 30 anni per combinazioni ZN-PI

Campione	Tempo di ritorno di 30 anni				
	Tempo [min]	ρ max [mm/min]	ρ carico [mm/min]	ρ scarico [mm/min]	J [mm/min]
13 A ZN PI	9,50	3,29	2,08	0,29	3,09
9 B ZN PI	8,11	3,10	2,23	0,22	3,07
7 C ZN PI	10,20	3,18	2,30	0,19	3,12

Per quanto riguarda i sistemi con Profilo termoformato invece si nota effettivamente come il deflusso, oltre ad avere un inizio molto più ritardato rispetto ai sistemi con perlite, sia molto più lento e dilazionato nel tempo. Inoltre dopo 30 minuti il deflusso è ancora presente e abbastanza elevato, a differenza del caso dei sistemi con perlite in cui invece è prossimo allo zero. Tutto ciò è ben visibile sia con substrato Vulcanico che con substrato Laterizio.

I sistemi con substrato Vulcanico e drenante Profilo termoformato infatti hanno delle velocità di deflusso in fase di carico molto inferiori a quelle per esempio del substrato Vulcanico con Perlite. Tuttavia vi sono differenze notevoli anche tra gli stessi sistemi con Profilo termoformato (Figura 62), infatti il sistema con erbacee è quello con un deflusso più rapido ed un picco di velocità più elevato,

seguito dal sistema con Sedum, che ha anche un andamento simile. Infine il sistema con suffruticose ha una velocità di deflusso molto bassa.

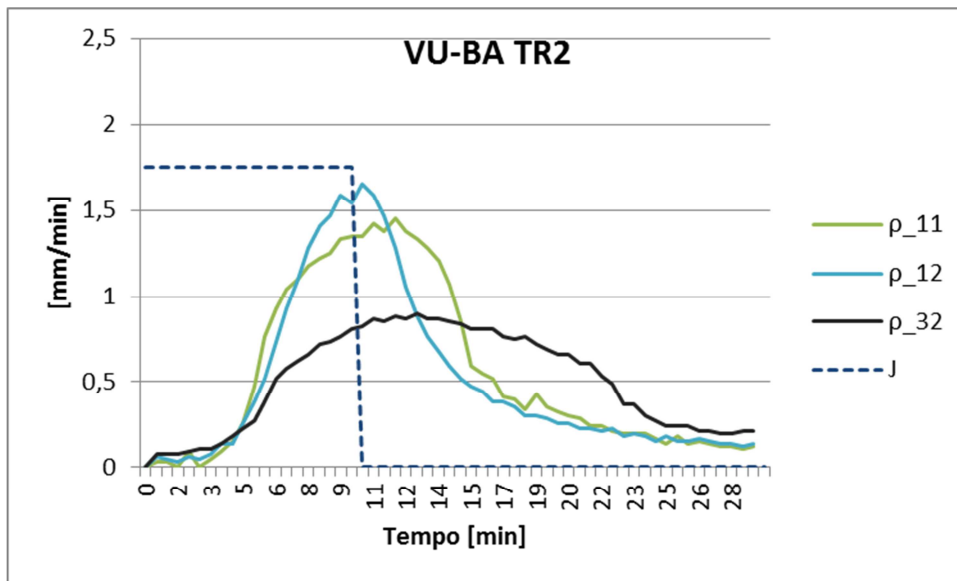


Figura 62: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 2 anni per sistemi Vulcanico e Profilo termoformato, campioni 11, 12, 32

Guardando i dati di velocità di deflusso riportati in Tabella 18 si riscontra infatti come il sistema a erbacee abbia il picco di velocità più elevato (1,65 mm/min), ma comunque una velocità di deflusso in fase di carico inferiore al Sedum.

Una particolarità è che la velocità di deflusso del sistema con suffruticose in fase di carico è più bassa della velocità in fase di scarico, ad indicare come questa rimanga estremamente costante anche molto dopo la fine della simulazione di pioggia.

Inoltre le velocità in fase di carico risultano ancora più basse dell'intensità di pioggia media, con una differenza con il sistema peggiore di quasi 1 mm/min.

Tabella 18: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 2 anni per combinazioni VU-BA

Campione	Tempo di ritorno di 2 anni				
	Tempo [min]	ρ max [mm/min]	ρ carico [mm/min]	ρ scarico [mm/min]	J [mm/min]
11 A VU BA	11,50	1,45	0,74	0,26	1,76
12 B VU BA	10,24	1,65	0,67	0,25	1,74
32 C VU BA	12,81	0,90	0,49	0,86	1,75

Nel caso della simulazione con tempo di ritorno di 30 anni (Figura 63) questi comportamenti non fanno altro che accentuarsi a parte il fatto che il sistema con suffruticose non ha più la velocità di deflusso in fase scarico maggiore di quella di carico, per cui ha un comportamento più simile agli altri

due sistemi. In entrambi i grafici comunque si può notare come la velocità di deflusso inizia ad aumentare solo dopo circa i primi 3 minuti di pioggia.

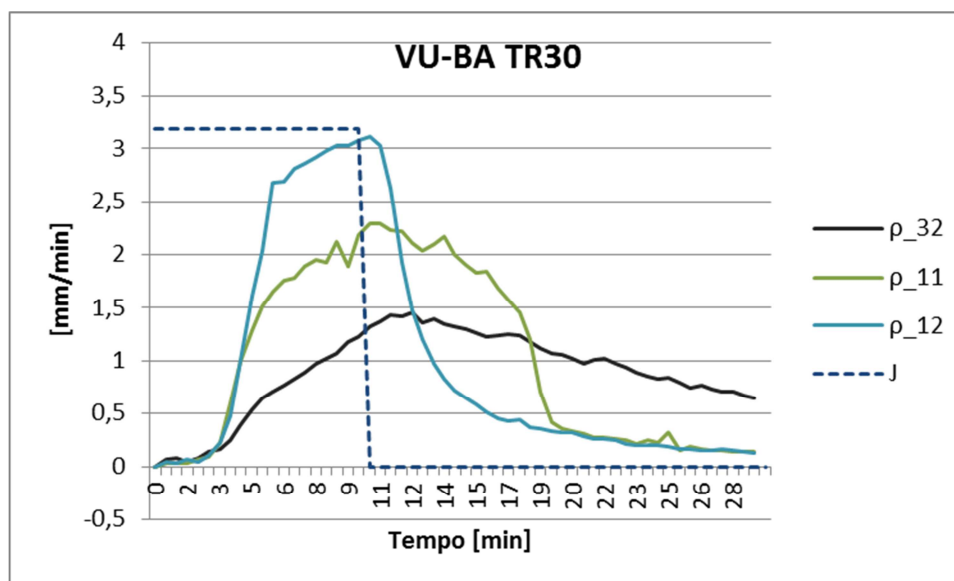


Figura 63: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 30 anni per sistemi Vulcanico e Profilo termoformato, campioni 11, 12, 32

Anche in questo caso il picco di velocità di deflusso è oltre i primi 10 minuti dell'evento di pioggia. In particolare per il sistema con suffruticose per il quale il picco di velocità si ha dopo oltre 2 minuti dalla fine della simulazione di pioggia (Tabella 19). La differenza tra velocità di deflusso in fase di carico e intensità di pioggia è di quasi 1,4 mm/min, per il sistema peggiore.

Tabella 19: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 30 anni per combinazioni VU-BA

Campione	Tempo di ritorno di 30 anni				
	Tempo [min]	ρ max [mm/min]	ρ carico [mm/min]	ρ scarico [mm/min]	J [mm/min]
11 A VU BA	10,00	2,29	1,22	0,51	3,18
12 B VU BA	10,22	3,12	1,74	0,33	3,12
32 C VU BA	12,24	1,45	0,75	0,58	3,09

I sistemi con substrato Laterizio e drenante Profilo termoformato invece per il tempo di ritorno di 2 anni hanno, a parte il sistema con erbacee perenni, un comportamento più uniforme (Figura 64). Infatti i sistemi con Sedum e suffruticose hanno un andamento e dei valori molto simili. In ogni caso i valori di picco della velocità di deflusso rimangono ben lontani dall'intensità media di pioggia, non raggiungendola mai.

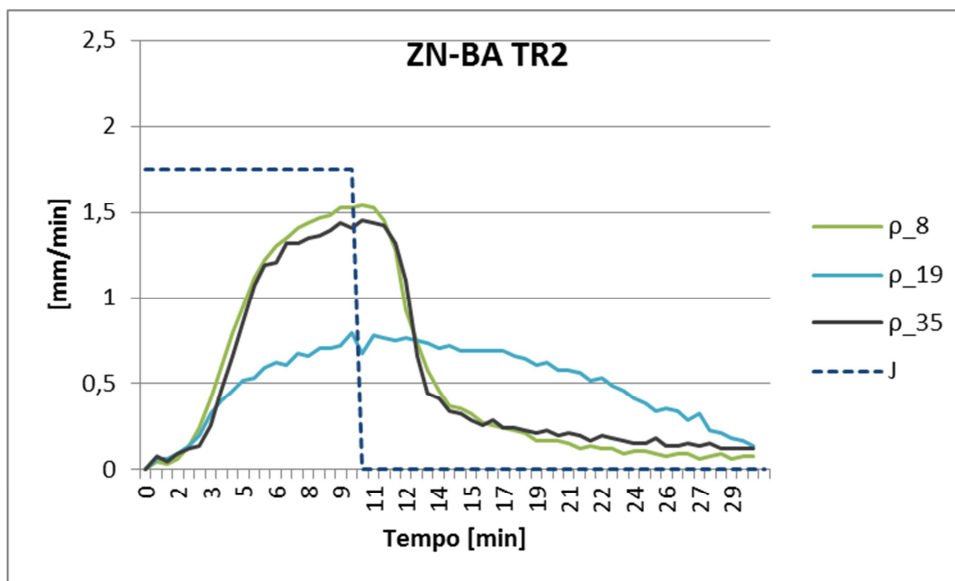


Figura 64: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 2 anni per sistemi Laterizio e Profilo termoformato, campioni 8, 19, 35

Infatti, come risulta dai dati di Tabella 20, le velocità di deflusso in fase di carico sono molto basse ed estremamente inferiori all'intensità media di pioggia, ancora di più che per la combinazione substrato vulcanico e profilo termoformato.

Tabella 20: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 2 anni per combinazioni ZN-BA

Campione	Tempo di ritorno di 2 anni				
	Tempo [min]	ρ max [mm/min]	ρ carico [mm/min]	ρ scarico [mm/min]	J [mm/min]
8 A ZN BA	10,00	1,54	0,93	0,19	1,80
19 B ZN BA	9,69	0,79	0,47	0,33	1,73
35 C ZN BA	10,24	1,45	0,86	0,22	1,73

Nel caso del tempo di ritorno di 30 anni (Figura 65) invece il sistema con Sedum si discosta da quello con suffruticose. Le velocità di deflusso iniziano ad aumentare circa dopo il primo minuto e mezzo di pioggia, in contrasto con i sistemi con vulcanico e profilo termoformato.

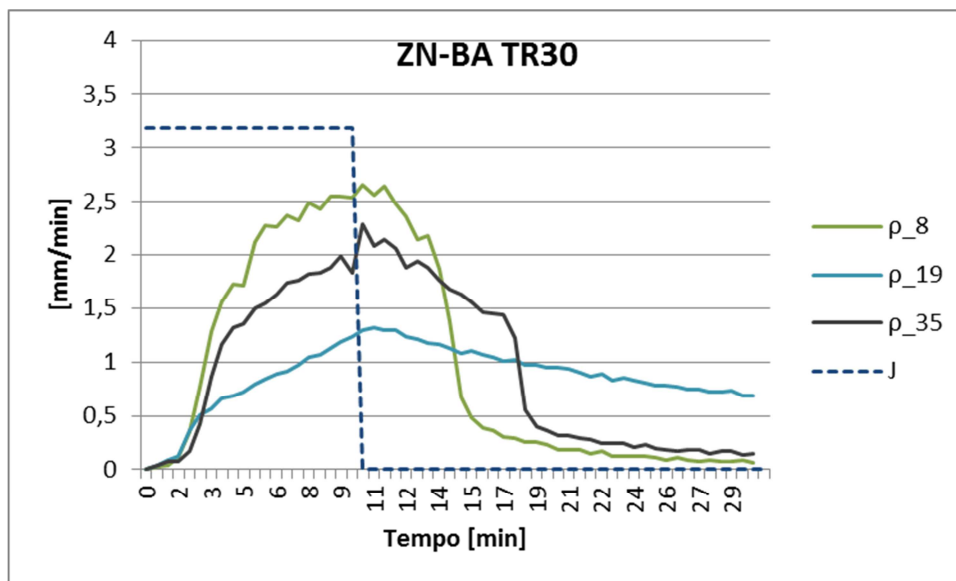


Figura 65: Intensità di pioggia (J) e velocità di drenaggio (ρ) per tempo di ritorno di 30 anni per sistemi Laterizio e Profilo termoformato, campioni 8, 19, 35

Comunque i picchi di velocità di deflusso sono raggiunti dopo i 10 minuti di pioggia e non raggiungono mai l'intensità di pioggia media. Come per il tempo di ritorno di 2 anni il sistema ad avere una velocità di deflusso in fase di carico minore è quello con erbacee mentre in questo caso quello con il deflusso più rapido è quello con Sedum, con una differenza di 0,85 mm/min (Tabella 21).

Tabella 21: Velocità di deflusso per il tempo di ritorno di 30 anni per combinazioni ZN-BA

Campione	Tempo di ritorno di 30 anni				
	Tempo [min]	ρ max [mm/min]	ρ carico [mm/min]	ρ scarico [mm/min]	J [mm/min]
8 A ZN BA	10,00	2,66	1,63	0,33	3,11
19 B ZN BA	10,73	1,31	0,78	0,59	3,10
35 C ZN BA	10,21	2,29	1,27	0,49	3,09

Per quanto riguarda i substrati, mantenendo come drenante il profilo termoformato, la differenza è che, in particolare per il tempo di ritorno di 2 anni, nel caso del substrato Vulcanico il deflusso comincia ad aumentare dopo i primi 4-5 minuti (Figura 62) mentre nel caso del Laterizio il deflusso aumenta prima (Figura 64). Quindi possiamo dedurre che il Vulcanico abbia una capacità di spostare il picco di deflusso leggermente maggiore. Per quanto riguarda le prove con tempo di ritorno di 30 anni invece la velocità di deflusso aumenta ma aumenta anche la differenza tra le velocità dei singoli miscugli, inoltre l'aumento del deflusso è più immediato.

Si può comunque notare una differenza abbastanza marcata tra sistemi con Profilo termoformato e con Perlite. I sistemi con Profilo termoformato sono caratterizzati da un deflusso più lento e dilazionato nel tempo rispetto ai sistemi con Perlite.

Proprio da questi grafici si nota come in realtà il Profilo termoformato faccia più fatica a drenare l'acqua e inoltre la velocità non sia uguale in tutti i campioni ma vari da sistema a sistema pur mantenendo costante il substrato. Una differenza di questo tipo non può essere imputabile alla sola vegetazione anche perchè le stesse differenze non si notano nei sistemi con perlite.

Come sottolineato nell'analisi dei grafici di pioggia accumulata e drenata del paragrafo precedente, questo particolare comportamento, soprattutto per i campioni 19 e 32, potrebbe essere dovuto allo strato protettivo di fibra di polietilene e polipropilene, che molto probabilmente è andato ad ostruire parzialmente il foro di scarico del sistema, falsando in questo modo i dati di deflusso.

Capacità di ritenzione idrica

Per calcolare la capacità di ritenzione idrica è stato necessario ricavare il peso secco del sistema. Innanzitutto si è proceduto a tagliare la vegetazione dei microcosmi e pesarla, appena tagliata e dopo averla essiccata in stufa. I dati di peso della vegetazione di ogni microcosmo sono riportati in Tabella 22.

Come prevedibile il Sedum è il miscuglio con il contenuto d'acqua più elevato, con percentuali che arrivano all'84%, mentre le suffruticose sono quelle con valori più bassi, con un massimo di 52%, infine le erbacee hanno un massimo contenuto di acqua del 57%.

Tabella 22: Pesì delle piante umide e secche prelevate da ogni microcosmo

Campione	Peso piante [kg]		Contenuto d'acqua	
	umide	secche	[L]	[%]
11 A VU BA	1,55	0,26	1,29	83,3
12 B VU BA	0,17	0,08	0,08	49,6
32 C VU BA	0,14	0,11	0,03	21,7
34 A VU PI	0,99	0,15	0,84	84,4
3 B VU PI	0,18	0,08	0,11	57,0
6 C VU PI	0,26	0,13	0,13	51,0
8 A ZN BA	1,10	0,17	0,93	84,3
19 B ZN BA	0,25	0,11	0,14	55,6
35 C ZN BA	0,45	0,22	0,24	52,1

13	A	ZN	PI	1,73	0,28	1,5	84,1
9	B	ZN	PI	0,31	0,14	0,2	53,4
7	C	ZN	PI	0,38	0,20	0,2	47,4

Quindi sono stati ricavati i pesi di ogni singolo componente di microcosmo (Tabella 23). Per i substrati sono stati utilizzati i dati di peso secco ricavati da Simonato (2014) facendo essiccare un dm³ di ciascun substrato in stufa a 105°C per 24 ore. Per gli altri elementi sono stati considerati i dati riportati nelle schede tecniche dei vari prodotti, a parte per i sacchi di perlite che, essendo stati modificati appositamente per la prova, hanno forme e pesi differenti dagli originali, per cui sono stati nuovamente considerati i dati di Simonato (2014).

Tabella 23: Pesì dei vari componenti dei microcosmi di tetto verde

Tipologia	Componenti	Peso [kg]
SUBSTRATI	Vulcanico	45,38
	Laterizio	42,14
STRATO FILTRANTE	Strato filtrante	0,05
PI	Sacco di perlite	2,70
	Strato protettivo	0,03
	Totale PI	2,73
BA	Profilo termoformato	0,79
	Strato protettivo	0,48
	Totale BA	1,27
STRUTTURA	Struttura	11,05
	Tubo scarico	0,51
	Supporti	8,18
	Cassetta	4,21
	Totale struttura	23,95

In Tabella 24 sono riassunti i pesi delle quattro combinazioni di substrati e strati di accumulo e protezione utilizzate.

Tabella 24: Pesì complessivi delle varie combinazioni di substrato e drenante

Combinazione substrato-drenante	Peso [kg]
VU-PI	72,12
VU-BA	70,65
ZN-PI	68,87
ZN-BA	67,41

Per ogni prova quindi sono stati considerati i pesi iniziali, facendo una media tra le tre prove per tempo di ritorno, e i pesi massimi raggiunti dai microcosmi durante le simulazioni di pioggia, di cui è sempre stata fatta una media tra le tre prove per tempo di ritorno. In Tabella 25 sono quindi riportati i pesi iniziali e i pesi massimi per tempo di ritorno da cui è stato possibile, portandoli al netto del peso secco della struttura, ricavare la quantità d'acqua immagazzinata in ciascuno all'inizio della prova, e quindi la capacità di ritenuta idrica di ogni microcosmo, e la quantità d'acqua massima immagazzinabile dal sistema durante l'evento di pioggia, comprensiva della capacità di ritenuta idrica e dell'acqua accumulata dell'evento di pioggia.

Tabella 25: Pesì dei campioni all'inizio della prova e pesi massimi raggiunti durante la prova

Campione	Peso iniziale campione [kg]		Peso massimo campione [kg]	
	TR 2 anni	TR 30 anni	TR 2 anni	TR 30 anni
11 A VU BA	98,5	98,4	103,3	106,9
12 B VU BA	95,8	95,8	100,5	101,8
32 C VU BA	91,7	91,5	97,5	102,1
34 A VU PI	105,6	105,8	109,9	111,0
3 B VU PI	100,0	99,9	103,1	104,1
6 C VU PI	104,2	104,2	107,8	109,2
8 A ZN BA	97,3	97,5	101,1	103,6
19 B ZN BA	96,7	96,7	102,1	106,7
35 C ZN BA	95,5	95,1	99,3	103,0
13 A ZN PI	106,6	106,7	109,9	110,9
9 B ZN PI	105,7	105,6	108,2	109,1
7 C ZN PI	107,1	107,0	109,4	110,6

In Tabella 26 sono quindi riportati i valori calcolati di capacità di ritenzione idrica (WRC_1) e della stessa sommata all'acqua accumulata durante l'evento di pioggia simulato (WRC_2) per ogni

microcosmo. Sono stati calcolati per ogni tempo di ritorno, ma per avere un quadro complessivo e facilitare i confronti si è preferito utilizzare il valore medio per ogni microcosmo.

Tabella 26: Valori di WRC₁ e di WRC₂ per ogni microcosmo per i due tempi di ritorno e medi

Campione	WRC ₁ [mm]			WRC ₂ [mm]		
	TR 2 anni	TR 30 anni	Media	TR 2 anni	TR 30 anni	Media
11 A VU BA	63,2	63,1	63,1	74,3	82,5	78,4
12 B VU BA	57,6	57,5	57,5	68,2	71,3	69,7
32 C VU BA	48,0	47,5	47,7	61,2	71,9	66,6
34 A VU PI	76,4	76,9	76,6	86,2	88,8	87,5
3 B VU PI	63,8	63,5	63,6	70,9	73,1	72,0
6 C VU PI	73,1	73,2	73,2	81,6	84,6	83,1
8 A ZN BA	68,2	68,5	68,3	76,7	82,7	79,7
19 B ZN BA	66,9	66,8	66,8	79,2	89,9	84,5
35 C ZN BA	64,0	63,0	63,5	72,6	81,2	76,9
13 A ZN PI	85,9	86,0	85,9	93,5	95,7	94,6
9 B ZN PI	84,0	83,9	84,0	89,9	91,9	90,9
7 C ZN PI	87,1	86,9	87,0	92,4	95,2	93,8

Dalla rappresentazione di Figura 66 si coglie come generalmente i sistemi con una capacità di ritenzione idrica maggiore siano innanzitutto i sistemi con substrato Laterizio e drenante Perlite, seguiti mediamente da quelli sempre con drenante Perlite e substrato Vulcanico. Si nota come, anche nel caso il drenante sia il Profilo termoformato il substrato con una maggiore capacità di ritenzione idrica sia il Laterizio.

Per quanto riguarda la vegetazione, il miscuglio per cui risultano i valori di WRC₁ migliori è il Sedum, anche se questo è notevole principalmente per la composizione Vulcanico-Profilo termoformato. In particolare il miscuglio di suffruticose risulta avere una WRC molto bassa, questo, guardando i valori di copertura, potrebbe essere giustificato dal fatto che questo microcosmo sia quello con la percentuale di copertura minore. Negli altri casi i sistemi a Sedum sono solo leggermente avvantaggiati rispetto agli altri, tranne per il caso della composizione Laterizio-Perlite in cui è appena migliore il sistema con suffruticose, tuttavia le differenze sono davvero minime.

Si può notare comunque che i microcosmi con le erbacee sono generalmente quelli con valori più bassi di capacità di ritenzione idrica.

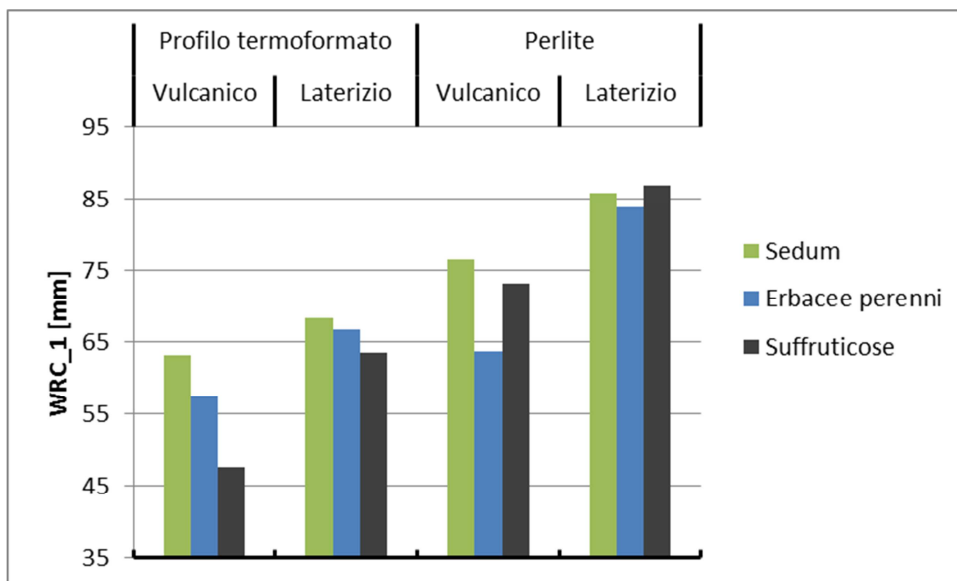


Figura 66: Valori di WRC_1 in mm per i diversi microcosmi

Invece interessante nel caso di WRC_2 (Figura 67) è notare come, se nei sistemi nella cui composizione è presente la perlite non varia di molto la quantità di acqua accumulata, i sistemi con drenante profilo termoformato invece sono ancora in grado di contenere molta acqua precipitata. Dalle rappresentazioni grafiche sono stati tolti i valori anomali del campione 19 e 32.

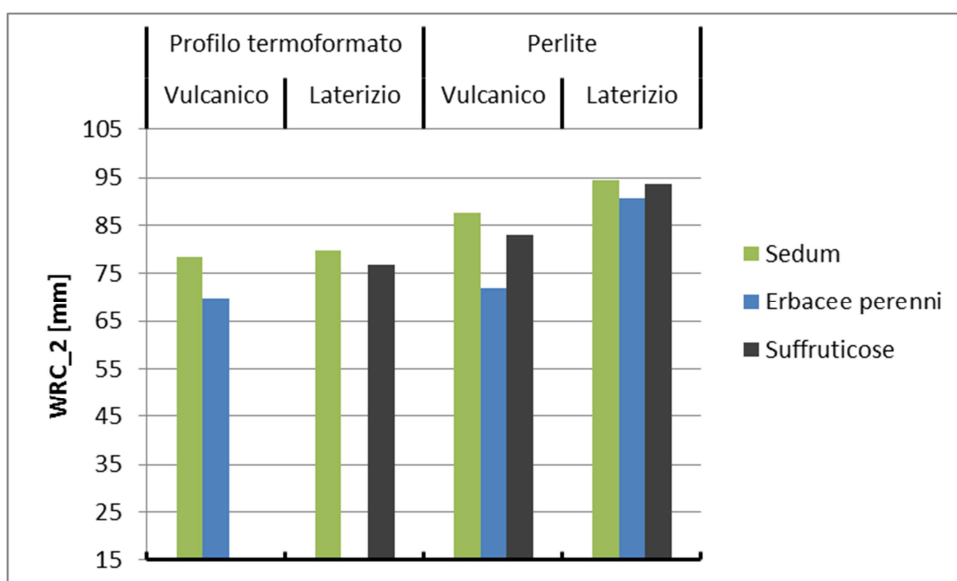


Figura 67: Valori di WRC_2 in mm per i diversi microcosmi

I microcosmi con strato di accumulo e drenaggio di perlite sono dunque quelli con una maggiore capacità di ritenzione idrica.

In compenso per quanto riguarda la possibilità di immagazzinare l'acqua durante l'evento di pioggia il comportamento migliore lo hanno i microcosmi con profilo termoformato che probabilmente per il fatto di avere una struttura più rigida che crea dei vuoti, visibile in Figura 68, è in grado di accumulare momentaneamente più acqua durante la pioggia. I vuoti infatti non vanno a contribuire alla capacità

di ritenzione idrica, mentre possono fungere da ‘serbatoio’ durante l’evento di pioggia. Inoltre il fatto di avere uno strato di protezione fibroso (Figura 69) può aumentare la trattenuta della pioggia, aumentando la resistenza al deflusso (Vesuviano et al. 2013). Inoltre può esserci stata nel tempo l’infiltrazione di particelle fini sia nei fori del drenante sia nelle porosità dello strato di feltro andando a ridurre quindi la permeabilità di questi due componenti. Altro fattore che potrebbe influire è lo sviluppo delle radici all’interno dello strato drenante che potrebbe concorrere anche questo all’ostruzione dei fori. Queste osservazioni sono solo delle ipotesi e non sono state verificate, andranno analizzate alla fine di tutte le sperimentazioni con la rimozione dei vari strati e lo studio dell’apparato radicale delle piante e del compattamento dei substrati.



Figura 68: Profilo termoformato (Bauder S.r.l. 2015) **Figura 69: Tessuto di protezione in fibra di poliestere e polipropilene**

A dimostrazione di ciò, come si può notare anche in Tabella 27, le maggiori quantità di acqua trattenuta trattenuta sono caratteristiche proprio dei sistemi con profilo termoformato come strato di accumulo e drenaggio.

Tuttavia queste considerazioni non possono giustificare i valori troppo elevati dei campioni 19 e 32, dovuti appunto alla problematica dello strato protettivo discussa nei paragrafi precedenti.

Tabella 27: Massima quantità di acqua accumulata (acqua gravitazionale) della simulazione di pioggia, in mm e percentuale, dai microcosmi per i due tempi di ritorno

Campione	Acqua gravitazionale (WRC ₂ -WRC ₁)			
	TR 2 anni [mm]	TR 30 anni [mm]	TR 2 anni [%]	TR 30 anni [%]
11 A VU BA	11,1	19,4	66,1	64,2
12 B VU BA	10,7	13,8	63,5	45,6
32 C VU BA	13,3	24,4	79,0	80,8
34 A VU PI	9,8	12,0	58,2	39,6

3	B	VU	PI	7,1	9,6	42,2	31,9
6	C	VU	PI	8,5	11,5	50,4	38,0
8	A	ZN	BA	8,6	14,2	51,0	47,0
19	B	ZN	BA	12,3	23,1	73,4	76,4
35	C	ZN	BA	8,7	18,1	51,6	60,0
13	A	ZN	PI	7,6	9,7	45,5	32,0
9	B	ZN	PI	5,8	8,0	34,7	26,5
7	C	ZN	PI	5,4	8,3	32,0	27,4

In Figura 70 è riportata una rappresentazione dei valori in percentuale rispetto alla pioggia totale dell'acqua gravitazionale trattenuta dai sistemi, per le simulazioni con tempo di ritorno di 2 anni.

Per le composizioni con perlite i sistemi con una maggiore trattenuta sono, come prevedibile, quelli con Sedum mentre nel caso dei sistemi con profilo termoformato, non considerando quindi i campioni 19 e 32, non vi è un miscuglio di vegetazione che fa la differenza.

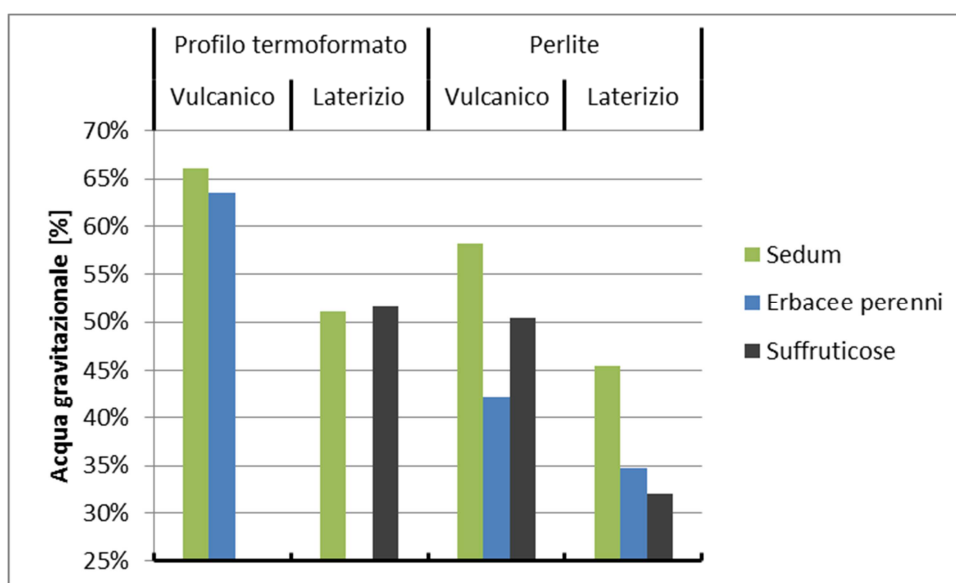


Figura 70: Valori di pioggia accumulata della simulazione (acqua gravitazionale) in percentuale per il tempo di ritorno di 2 anni per i diversi microcosmi

Per il tempo di ritorno di 30 anni le differenze si acquiscono, come ben visibile in Figura 71, per cui i sistemi con drenante perlite risultano avere dei valori nettamente inferiori ai sistemi con profilo termoformato.

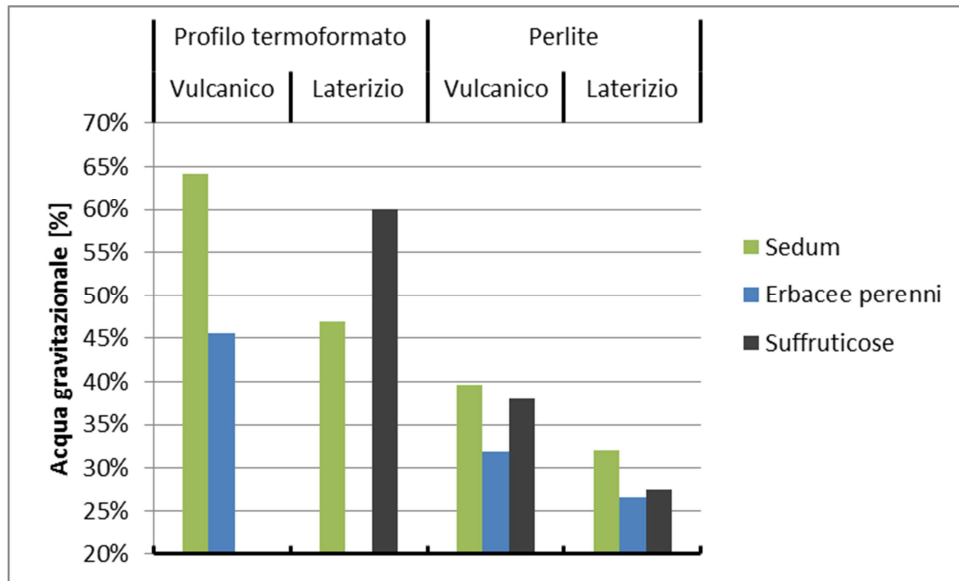


Figura 71: Valori di pioggia accumulata della simulazione (acqua gravitazionale) in percentuale per il tempo di ritorno di 30 anni per i diversi microcosmi

Si è cercato quindi, rappresentando tutti i dati tramite diagrammi a scatola e baffi, di individuare, a seconda delle componenti, quelle che garantiscono maggiori capacità di ritenzione idrica.

Dal test di Kruskal-Wallis emergono delle differenze statisticamente significative tra le mediane con un livello di confidenza del 95% per le tipologie di substrato e dello strato di accumulo e drenaggio ma non per la vegetazione, dove il P-value è maggiore di 0,05, per cui non viene individuata una differenza statisticamente significativa.

In Figura 72 si nota come le erbacee abbiano generalmente valori minori di WRC mentre i Sedum maggiori. La variabilità nei valori più grande è data dai microcosmi di suffruticose. Le differenze non sono comunque così evidenti e significative.

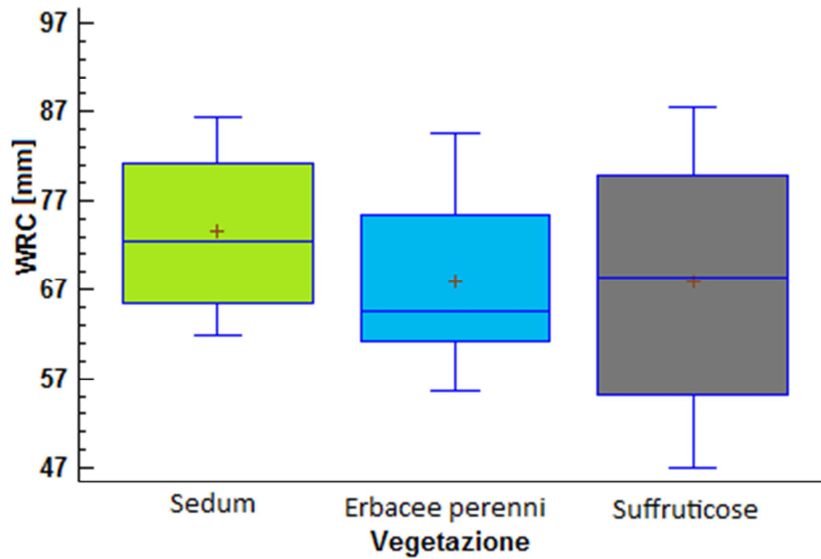


Figura 72: Valori di capacità di ritenzione idrica in mm in funzione del tipo di vegetazione

In Figura 73 invece si nota come le differenze di WRC confrontando i microcosmi per le tipologie di substrato siano maggiori e si può vedere come il laterizio abbia effettivamente valori più elevati di WRC, come dedotto precedentemente. La differenza è in questo caso statisticamente significativa.

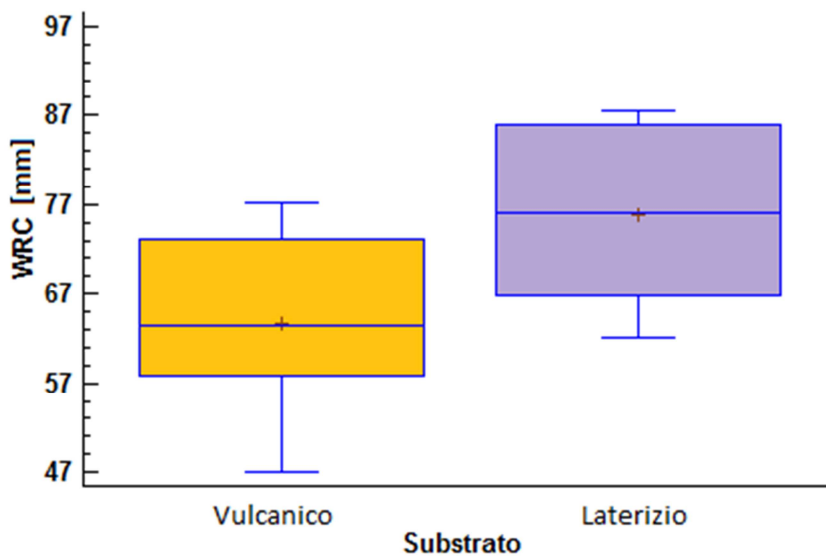


Figura 73: Valori di capacità di ritenzione idrica in mm in funzione del tipo di substrato

Infine sono stati confrontati i valori di WRC per microcosmi con diverso strato di accumulo e drenaggio (Figura 74), per cui si evince come i sistemi con perlite abbiano capacità di ritenzione idrica maggiori. Anche in questo caso la differenza è statisticamente significativa e risulta maggiore di quella tra i substrati.

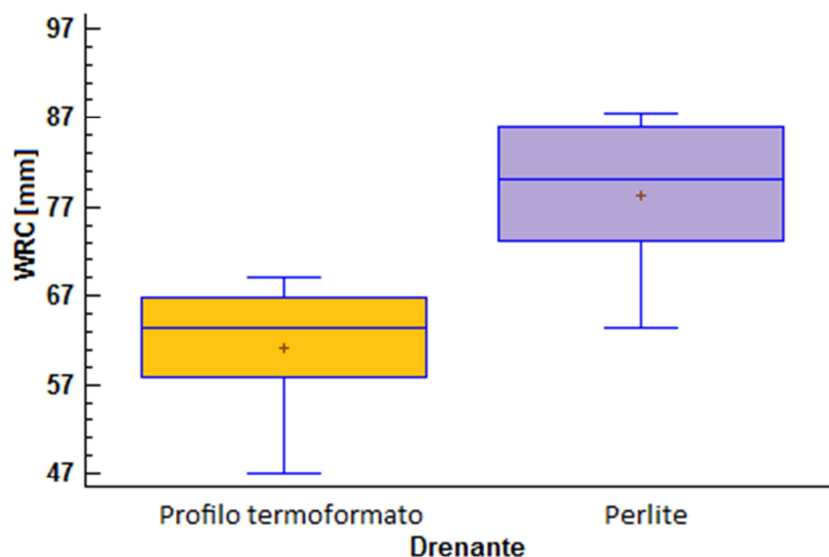


Figura 74: Valori di capacità di ritenzione idrica in mm in funzione del tipo di strato di accumulo e drenaggio

Nel caso dei valori di pioggia trattenuta dai microcosmi durante la simulazione, in grafico chiamata acqua gravitazionale, il test di Kruskal-Wallis individua delle differenze significative per tutti e tre i componenti.

Infatti si vede una maggiore differenza per quanto riguarda l'influenza della tipologia di vegetazione., dove i microcosmi con Sedum hanno generalmente dei maggiori valori di acqua gravitazionale trattenuta (Figura 75).

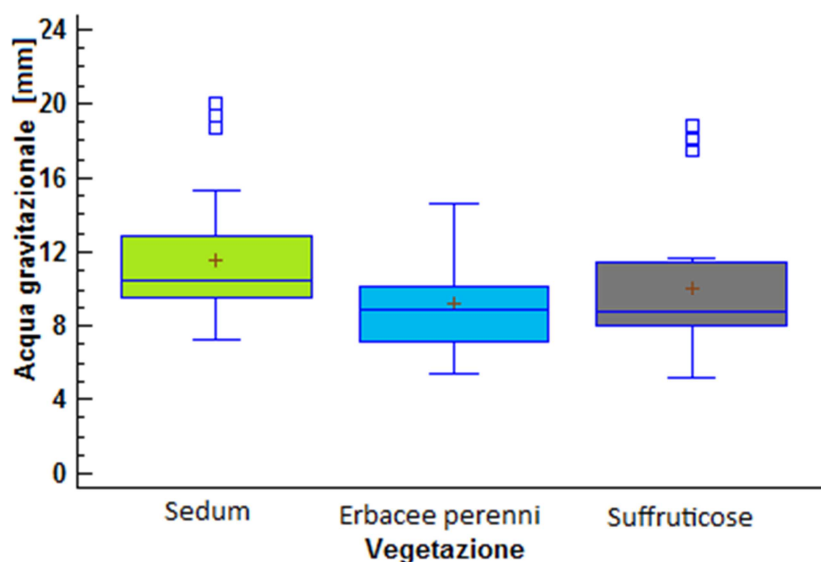


Figura 75: Valori di pioggia trattenuta durante le simulazioni (acqua gravitazionale) in mm in funzione del tipo di vegetazione

In relazione al substrato (Figura 76) invece, come analizzato in precedenza, i microcosmi con una maggiore acqua gravitazionale trattenuta sono quelli con substrato Vulcanico.

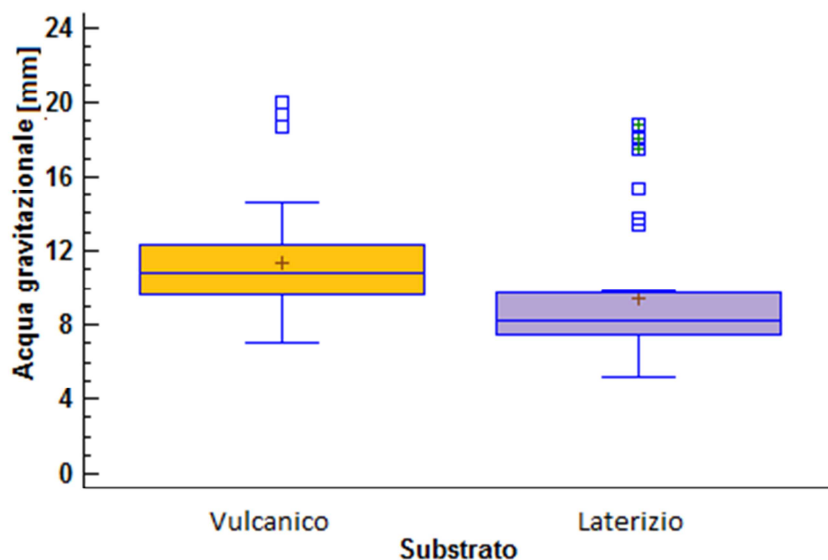


Figura 76: Valori di pioggia trattenuta durante le simulazioni (acqua gravitazionale) in mm in funzione del tipo di substrato

Infine, come prevedibile, i microcosmi con strato di accumulo e drenaggio di profilo termoformato sono quelli che hanno valori maggiori (Figura 77), ma anche una maggiore variabilità tra microcosmi, a conferma delle differenze notate nei comportamenti dei grafici di accumulo e drenaggio discussi nei paragrafi precedenti. Anche in questo caso lo strato di accumulo e drenaggio è quello per cui si ha una differenza più significativa.

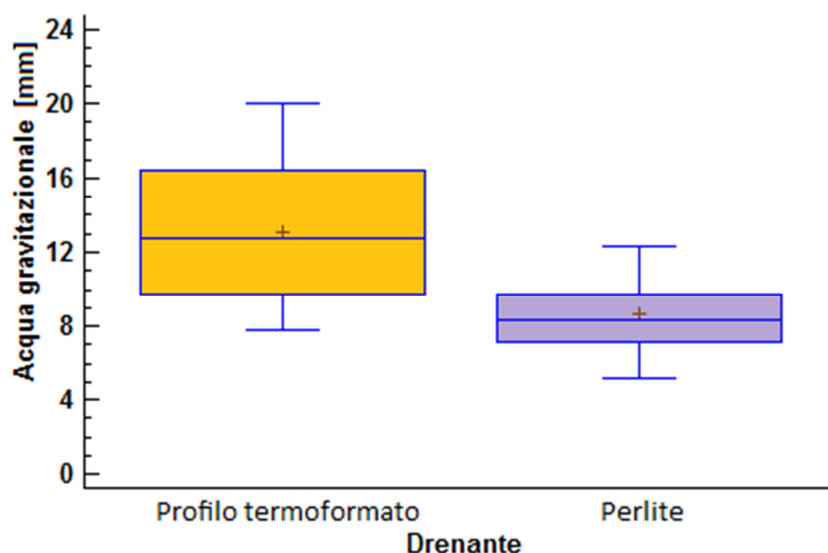


Figura 77: Valori di pioggia trattenuta durante le simulazioni (acqua gravitazionale) in mm in funzione del tipo di drenante

In conclusione per quanto la capacità di ritenzione idrica maggiore l'abbiano i sistemi con substrato Laterizio e drenante Perlite, la capacità di trattenere in condizioni critiche di saturazione l'acqua meteorica durante l'evento di pioggia si rivela essere maggiore per i sistemi con Profilo

termoformato, anche senza considerare i due outlier (campioni 19 e 32). In entrambi i casi il componente che influenza maggiormente i valori è lo strato di accumulo e drenaggio.

Calcolo del Curve Number

Per quanto riguarda il calcolo del Curve Number si riportano in Tabella 28 i dati ricavati dalla media delle tre prove per tempo di ritorno.

Le variabili ricavate dalla regressione non lineare sono dunque S, ovvero il volume specifico di saturazione del sistema, e I, ovvero l'assorbimento iniziale di pioggia dovuto ad intercettazione da parte della vegetazione, accumulo nelle depressioni superficiali e imbibimento iniziale del terreno.

Da questi, tramite la formula del CN-SCS, è stato possibile ricavare il Curve Number di ogni microcosmo in condizioni critiche di saturazione, CN(III), e poi ricavare il CN(II), ovvero del sistema in condizioni medie di saturazione.

Tabella 28: Valori di I, S e CN ricavati per regressione non lineare con il metodo del CN-SCS e i relativi errori

	Campione	I [mm]	S [mm]	CN(III)	CN(II)	R²	SE
<u>VU PI</u>	34 A VU PI	4,1	13,7	94,9	88,9	96,7	0,69
	3 B VU PI	3,0	8,8	96,7	92,6	98,8	0,55
	6 C VU PI	3,6	11,8	95,6	90,3	98,1	0,59
<u>ZN PI</u>	13 A ZN PI	3,2	9,1	96,5	92,3	98,2	0,63
	9 B ZN PI	2,4	6,6	97,5	94,3	99,4	0,39
	7 C ZN PI	2,4	6,4	97,6	94,5	99,5	0,38
<u>ZN BA</u>	8 A ZN BA	2,9	14,4	94,7	88,5	99,6	0,18
	19 B ZN BA	0,0	67,2	79,6	63,4	99,8	0,08
	35 C ZN BA	2,6	22,9	91,9	83,3	99,7	0,15
<u>VU BA</u>	11 A VU BA	4,2	26,5	90,6	80,7	98,7	0,25
	12 B VU BA	4,3	18,6	93,2	85,6	96,7	0,58
	32 C VU BA	3,3	66,6	79,7	63,3	99,7	0,07

Il modello del Curve Number si adatta bene alle prove effettuate e R² è sempre superiore al 95%, con errori standard molto bassi.

Per quanto riguarda i sistemi con perlite, si può notare come il CN più basso lo abbiano quelli con il miscuglio di Sedum, come prevedibile dall'analisi dei grafici di pioggia accumulata e drenata. In ogni caso confrontando, a parità di drenante, i substrati, quello con CN migliore risulta essere il Vulcanico.

Per quanto riguarda il CN dei sistemi con drenante profilo termoformato la prima evidenza è che i valori di CN sono molto più bassi dei sistemi precedenti. Quindi si nota come, a differenza dei sistemi con perlite dove è chiaro qual è la vegetazione migliore, non vi sia una netta distinzione, come era ben chiaro anche dalle analisi precedenti.

Nei seguenti grafici non sono stati rappresentati i campioni anomali, 19 e 32. Analizzando i valori di I (Figura 78) è ben visibile come, anche con drenanti differenti, i sistemi con substrato Vulcanico abbiano valori di intercettazione maggiori, mentre con drenante perlite si conferma migliore il miscuglio a sedum.

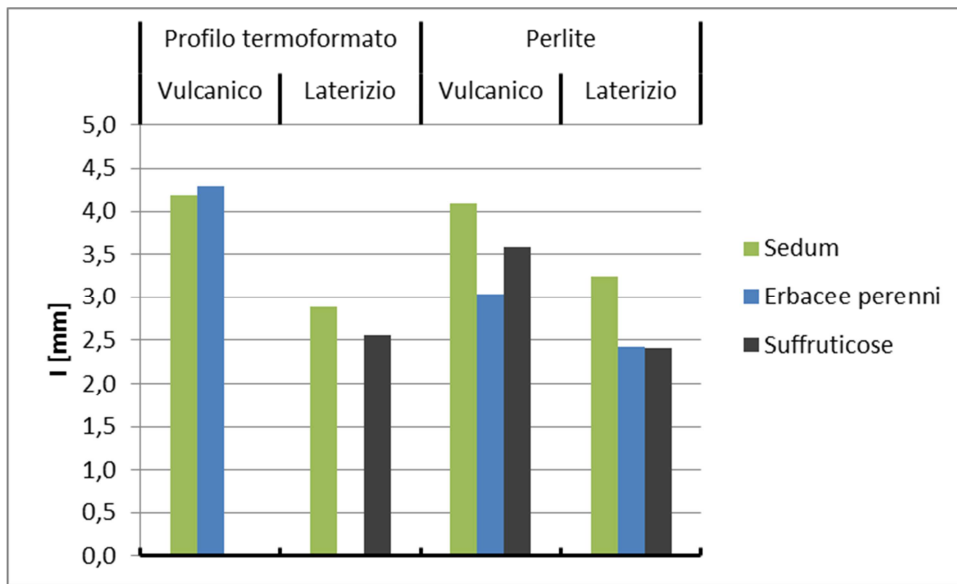


Figura 78: Valori di I in mm per ciascun microcosmo

Considerando invece i valori di S, si può vedere come i sistemi con profilo termoformato abbiano volumi di saturazione maggiori (Figura 79), mentre i sistemi con perlite abbiano generalmente valori più bassi, con una differenza, di quasi 13 mm tra i due sistemi migliori, ovvero il 34 e l'11.

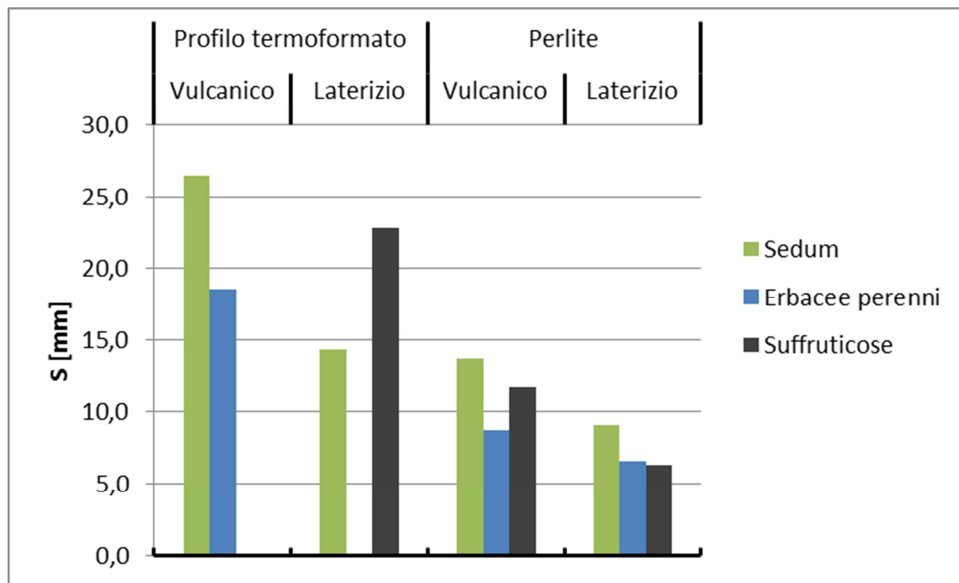


Figura 79: Valori di S in mm in relazione alle percentuali di copertura per ciascun microcosmo

Si è cercato quindi rappresentando tutti i dati tramite diagrammi a scatola e baffi di individuare, a seconda delle componenti, di identificare quelle che garantiscono valori di curve number più bassi. Per tutti e tre i componenti dal test di Kruskal-Wallis emergono delle differenze statisticamente significative tra le mediane con un livello di confidenza del 95%.

Si nota come i microcosmi con Sedum abbiano generalmente i valori di CN minori (Figura 80). In questo caso la differenza più significativa è tra la vegetazione di Sedum e le erbacee perenni.

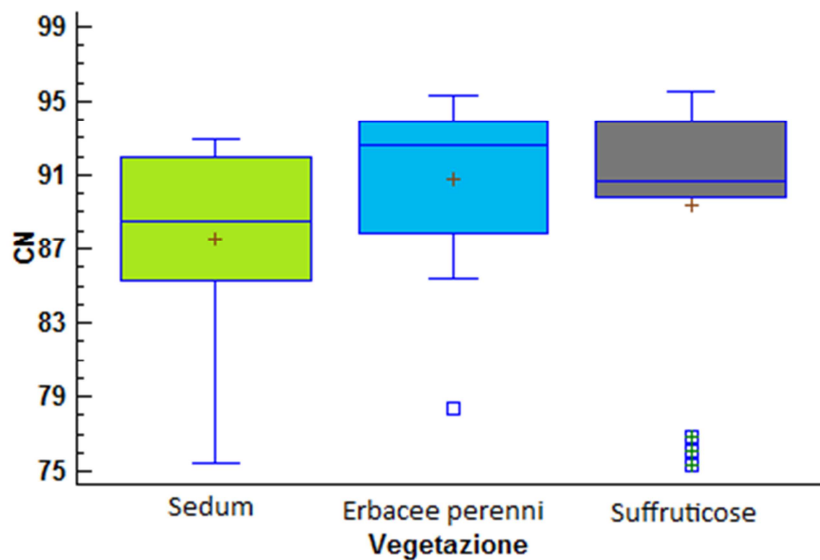


Figura 80: Valori di curve number in funzione del tipo di vegetazione

Per quanto riguarda i due substrati, come emerge dall'analisi dei grafici di accumulo e drenaggio, i microcosmi con substrato vulcanico estensivo hanno valori di CN minori rispetto a quelli con laterizio (Figura 81).

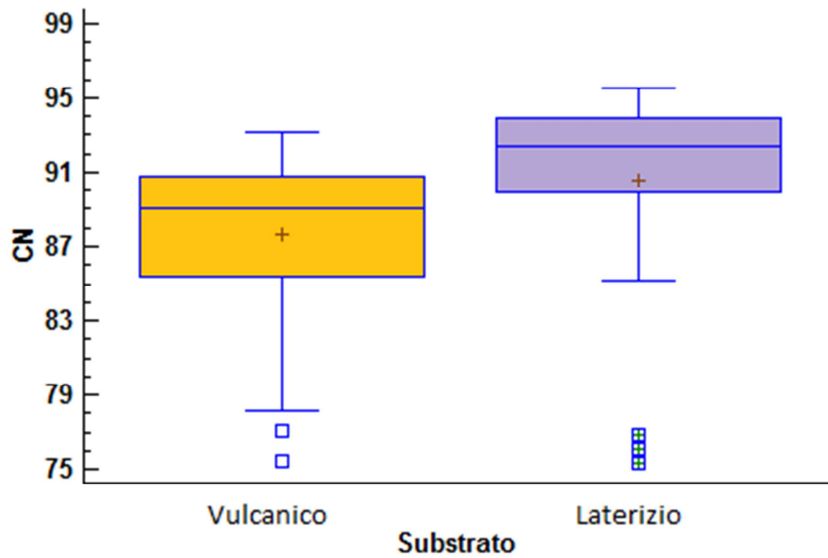


Figura 81: Valori di curve number in funzione del tipo di substrato

Una differenza ancora più evidente si ha tra microcosmi confrontando lo di strato di accumulo e drenaggio (Figura 82). In questo caso i microcosmi con il profilo termoformato, accumulando più acqua durante le simulazioni, hanno valori più bassi di CN.

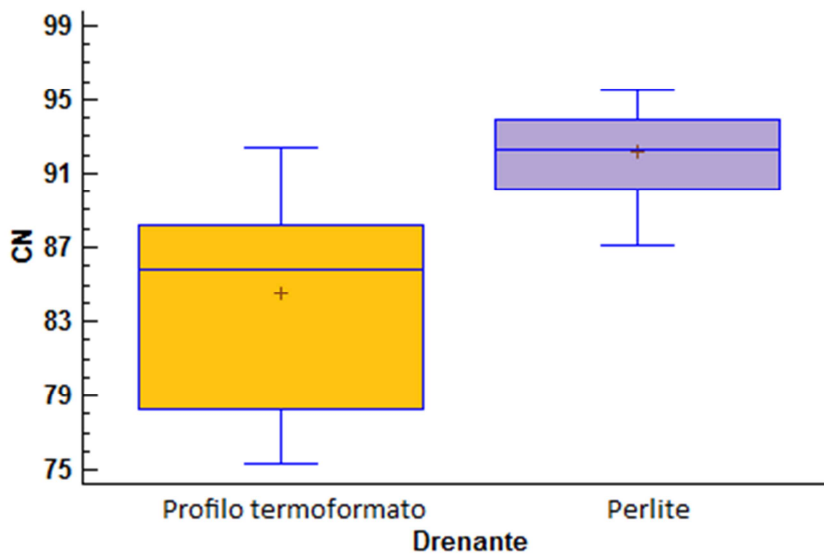


Figura 82: Valori di curve number in funzione del tipo di strato di accumulo e drenaggio

In conclusione la differenza più significativa è data dallo strato di accumulo e drenaggio.

In ogni caso i valori medi di CN(II) calcolati, non considerando gli outlier, sono 88 per i microcosmi con Sedum, 89 per quelli con suffruticose e 91 per quelli con erbacee perenni, nettamente più bassi rispetto a valori di CN per superfici di tetto tradizionale (98) (Getter et al. 2007).

Percentuali di copertura

Per quanto riguarda le percentuali di copertura dei micocosmi i dati sono riportati in Tabella 29, rappresentati in Figura 83.

Tabella 29: Percentuali di copertura della vegetazione dei micocosmi

Campione	Copertura vegetale [%]
11 A VU BA	83,0
12 B VU BA	60,2
32 C VU BA	51,7
34 A VU PI	75,1
3 B VU PI	81,7
6 C VU PI	73,7
8 A ZN BA	87,4
19 B ZN BA	74,7
35 C ZN BA	69,6
13 A ZN PI	79,7
9 B ZN PI	94,1
7 C ZN PI	70,8

Nel caso dei sistemi con strato di accumulo e drenaggio di Perlite la vegetazione che ha un sviluppo maggiore è quella erbacea, con coperture molto elevate, raggiungendo il 94% nel caso del substrato Laterizio e l'81% nel caso del substrato Vulcanico.

Per quanto riguarda i micocosmi con il Profilo termoformato invece la vegetazione che si è sviluppata meglio è il Sedum, con una copertura dell'87% con substrato Laterizio e dell'83% con substrato Vulcanico. La considerazione che si potrebbe fare è che, avendo effettivamente un minore capacità di ritenzione idrica e di conseguenza una minore capacità di campo, le piante possano aver sofferto maggiormente i periodi di carenza d'acqua e il caldo eccessivo, per questo è stato il Sedum, in quanto maggiormente resistente allo stress idrico ed agli sbalzi termici, quello in grado di svilupparsi maggiormente.

Mediamente lo sviluppo minore si ha con il substrato Vulcanico e come strato drenante il profilo termoformato mentre il migliore con substrato Laterizio e drenante Perlite.

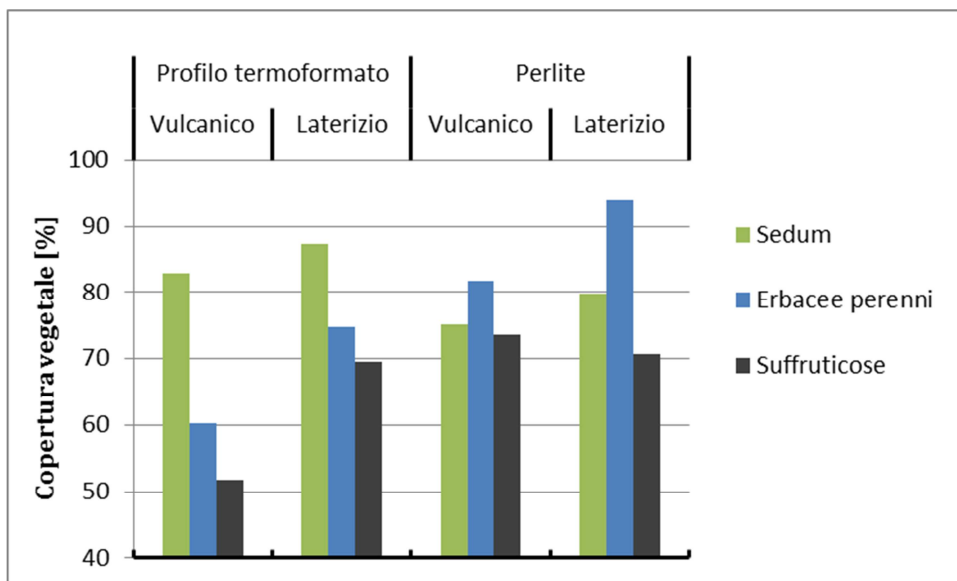


Figura 83: Percentuali di copertura vegetale per ciascun microcosmo

Si è quindi cercato di mettere in relazione le percentuali di copertura con i vari parametri idrologici calcolati. L'unico caso in cui risulta una relazione positiva con le percentuali di copertura è quello della capacità di ritenzione idrica (Figura 84), considerando tuttavia come per le composizioni con perlite i sistemi con una maggiore copertura, ovvero quelli con erbacee perenni, non hanno anche i maggiori valori di WRC. Il ragionamento invece può essere valido per i sistemi con profilo termoformato dove le più elevate percentuali di copertura rispecchiano i valori maggiori di WRC.

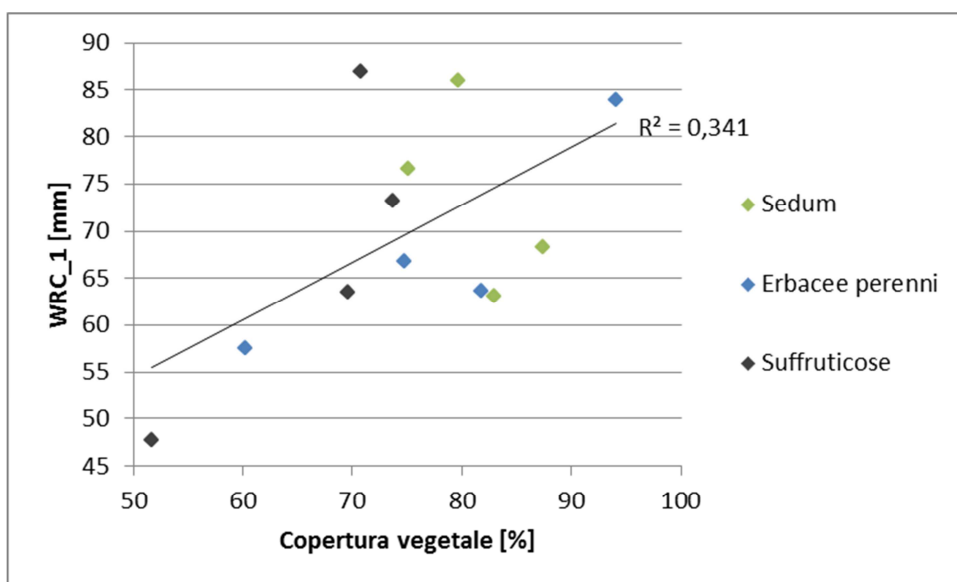


Figura 84: Relazione tra capacità di ritenzione idrica e copertura vegetale

Per quanto riguarda invece la relazione tra acqua gravitazionale e copertura vegetale non risulta alcuna correlazione positiva (Figura 85).

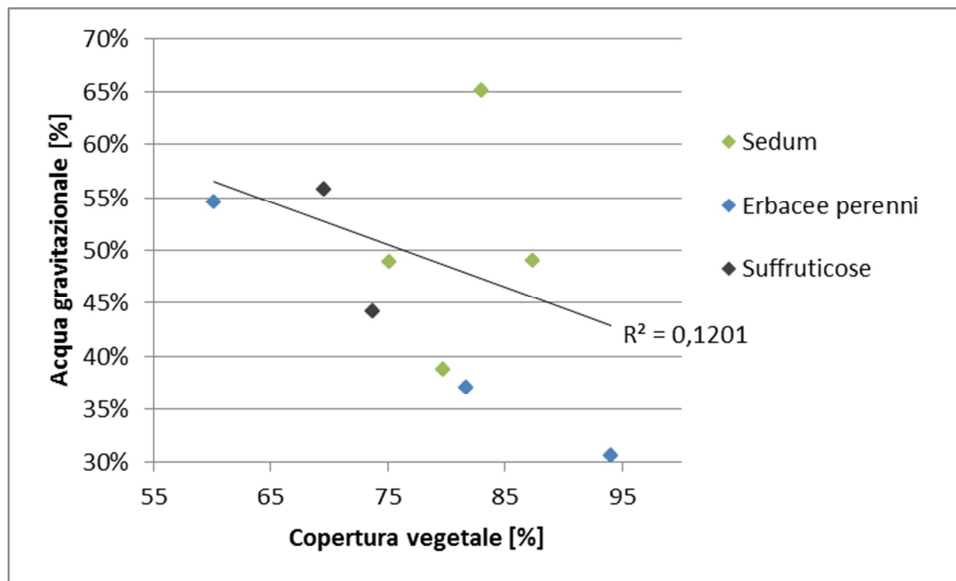


Figura 85: Relazione tra acqua gravitazionale e copertura vegetale

Anche se per il CN è difficile stabilire se la relazione con la copertura vegetale sia effettivamente valida, comunque risulta una lieve correlazione positiva dei dati (Figura 86).

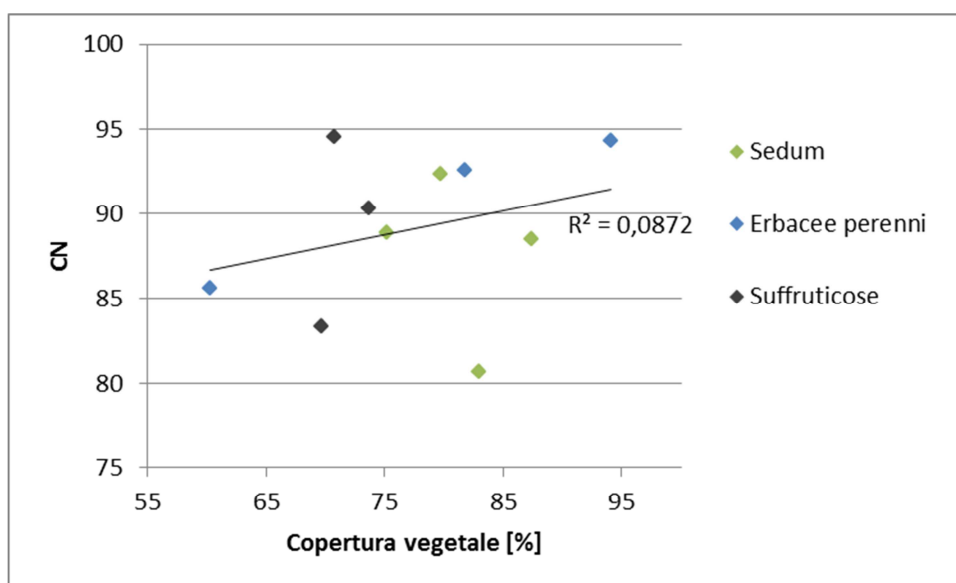


Figura 86: Relazione tra CN e copertura vegetale

4.2 Confronto con i dati di laboratorio senza vegetazione

Per poter avere un quadro migliore dell'effetto che la vegetazione ha su un sistema di tetto verde è stato possibile confrontare i risultati discussi con i dati di prove precedentemente eseguite sugli stessi campioni prima dell'impianto della vegetazione. Queste prove di laboratorio erano state

dunque effettuate singolarmente e in combinata sui diversi sistemi di accumulo e drenaggio e i substrati di coltivazione, con lo scopo di analizzare la loro effettiva capacità di ritenzione e la velocità di drenaggio della precipitazione.

Le intensità di pioggia simulate erano le medesime delle prove effettuate in questo studio, quindi sempre con intensità di 1,68 mm/min per un tempo di ritorno di 2 anni e di 3,02 mm/min per un tempo di ritorno di 30 anni.

La differenza tra le prove sta sostanzialmente nel simulatore di pioggia il quale nel frattempo è stato modificato, per poter ottenere delle simulazioni più precise ed accurate. Nel sistema precedente era costituito da un serbatoio di acqua posto sopra alla struttura del carrello del simulatore stesso il quale era forato con una griglia regolare di aghi da cui fuoriusciva l'acqua; a seconda dell'altezza d'acqua tenuta nel serbatoio il sistema forniva diverse intensità di pioggia. Tuttavia a causa della facilità di otturazione degli aghi e della difficoltà a mantenere costante l'altezza di carico nel serbatoio è stato preferito modificarlo fino ad ottenere la conformazione utilizzata per questo studio.

Inoltre le prove sono state eseguite su sistema secco (AMC=0) e su sistema saturo (AMC=3). In questo confronto chiaramente sono state considerate solo le prove eseguite su sistema saturo.

Sono stati effettuati dei confronti sulle capacità di ritenzione idrica dei microcosmi, sull'acqua accumulata durante la precipitazione e tra i valori di Curve Number.

4.2.1 Capacità di ritenzione idrica e acqua accumulata per sistemi con e senza vegetazione

In Tabella 30 sono riportati i valori di capacità di ritenzione idrica dei sistemi con vegetazione e della combinazione substrato e drenante senza vegetazione. Si può notare come in tutti i casi, tranne per il campione 32, la capacità di ritenzione idrica dei sistemi con vegetazione sia aumentata sensibilmente, fino ad un massimo di 30,8 mm di acqua in più.

Tabella 30: Valori di capacità di ritenzione idrica per sistemi con e senza vegetazione

Campione			WRC ₁ [mm]		
Substrato-drenante	Numero	Tipo di vegetazione	Con vegetazione	Senza vegetazione	Δ
VU-BA	11	A	63,1	51,5	11,6
	12	B	57,5		6,0
	32	C	47,7		-3,8
VU-PI	34	A	76,6	45,9	30,8
	3	B	63,6		17,8

	6	C	73,2		27,3
ZN-BA	8	A	68,3	50,4	17,9
	19	B	66,8		16,4
	35	C	63,5		13,1
ZN-PI	13	A	85,9	55,9	30,1
	9	B	84,0		28,1
	7	C	87,0		31,1

Dalla rappresentazione dei valori di Figura 87 si può notare, come già fatto in precedenza, che il sistema con una ritenzione idrica maggiore è anche nel caso dei sistemi senza vegetazione quello con la combinazione tra substrato Laterizio e drenante Perlite, anche se la differenza si nota poco tra quelli senza vegetazione mentre maggiormente nei microcosmi vegetati.

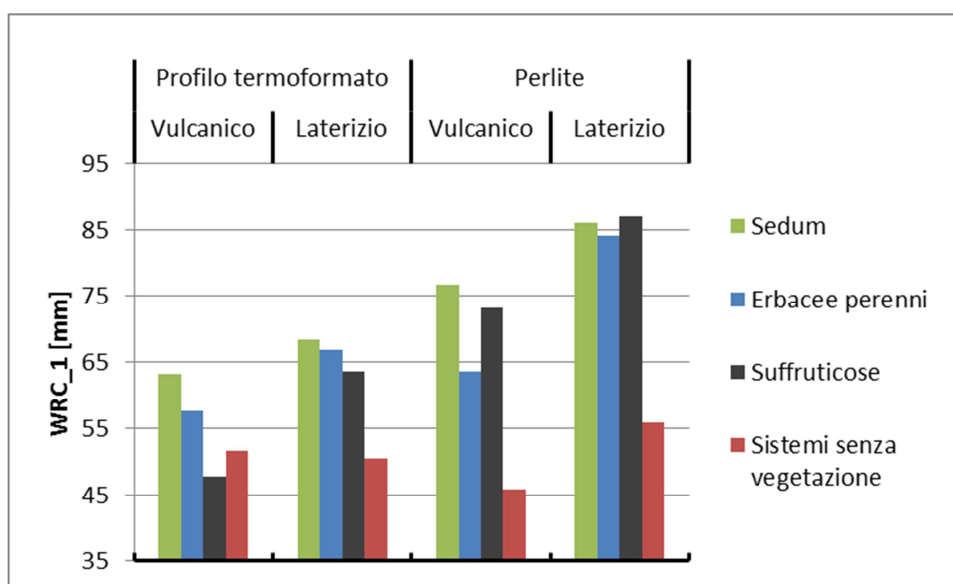


Figura 87: Confronto tra WRC₁ dei sistemi con e senza vegetazione

Analizzando più nello specifico le differenze tra i due tipi di sistemi in Figura 88 si può notare che la variazione media maggiore si abbia proprio nei campioni con Laterizio e Perlite ma anche nel caso della combinazione Vulcanico-Perlite i valori di capacità di ritenzione sono aumentati notevolmente. La combinazione che ha risentito meno del miglioramento è quella con Vulcanico-Perlite in cui vi è addirittura un campione che ha peggiorato questa caratteristica, forse per il fatto dello scarso sviluppo e delle cattive condizioni della vegetazione. La considerazione che si può fare è che, grazie allo sviluppo dell'apparato radicale delle piante, siano aumentate le microporosità del sistema permettendo una maggiore trattenuta idrica senza contare la quantità d'acqua immagazzinata nei tessuti delle piante. La caratteristica migliore sembra quindi averla il Sedum ma nel caso della

composizione Laterizio e Perlite risulta migliore, anche se di poco, il miscuglio di suffruticose. Interessante sarebbe vedere come l'apparato radicale si sia sviluppato nei diversi campioni.

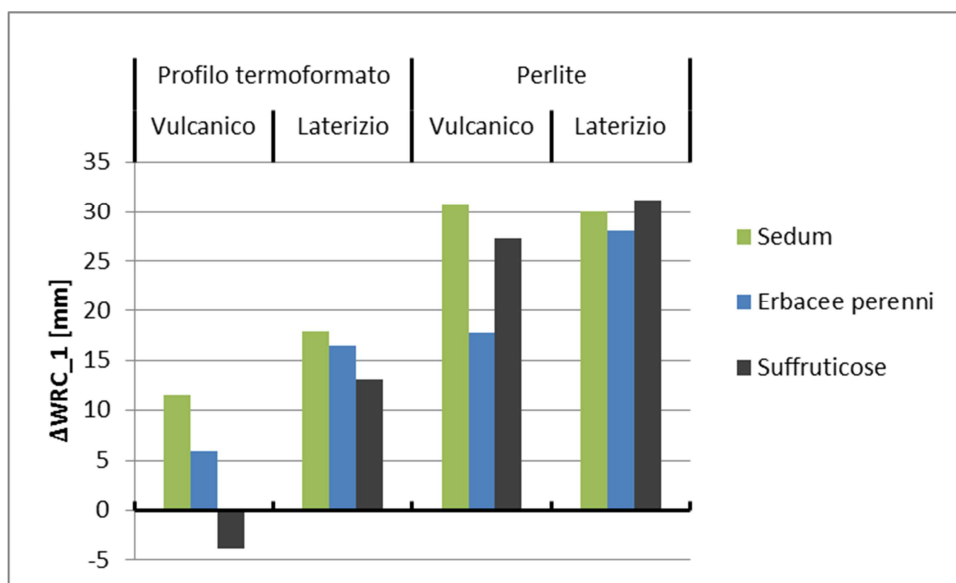


Figura 88: Differenza tra capacità di ritenzione idrica dei sistemi con e senza vegetazione

Per quanto riguarda la frazione di pioggia accumulata (acqua gravitazionale) nel microcosmo durante la simulazione, sono stati riportati i dati in Tabella 31 distinguendoli per tempo di ritorno. Si nota come per tempo di ritorno di 30 anni i valori di acqua gravitazionale siano maggiori per entrambe le tipologie di campioni. Tuttavia per i sistemi senza vegetazione la combinazione migliore non risulta essere con Profilo termoformato ed anzi per il tempo di ritorno di 2 anni il migliore è il drenante Perlite mentre per il tempo di ritorno di 30 anni non sembra esserci un substrato o un drenante migliore.

Tabella 31: Valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione

Campione			Acqua gravitazionale [mm]			
			Con vegetazione		Senza vegetazione	
Substrato-drenante	Numero	Tipo di vegetazione	TR 2 anni	TR 30 anni	TR 2 anni	TR 30 anni
VU-BA	11	A	11,2	19,3	4,6	8,4
	12	B	10,7	13,7		
	32	C	13,5	24,1		
VU-PI	34	A	9,6	12,2	6,8	10,3
	3	B	7,2	9,5		
	6	C	8,5	11,5		
ZN-BA	8	A	8,4	14,3	4,8	10,8

	19	B	12,4	23,0		
	35	C	9,1	17,7		
ZN-PI	13	A	7,6	9,7	6,2	8,6
	9	B	5,9	7,9		
	7	C	5,5	8,2		

In Figura 89 sono rappresentati il valori di acqua gravitazionale dalle varie soluzioni per le simulazioni con tempo di ritorno di 2 anni. Per i sistemi senza vegetazione si nota chiaramente la leggera predominanza della perlite sul profilo termoformato mentre non si vedono differenze tra substrati.

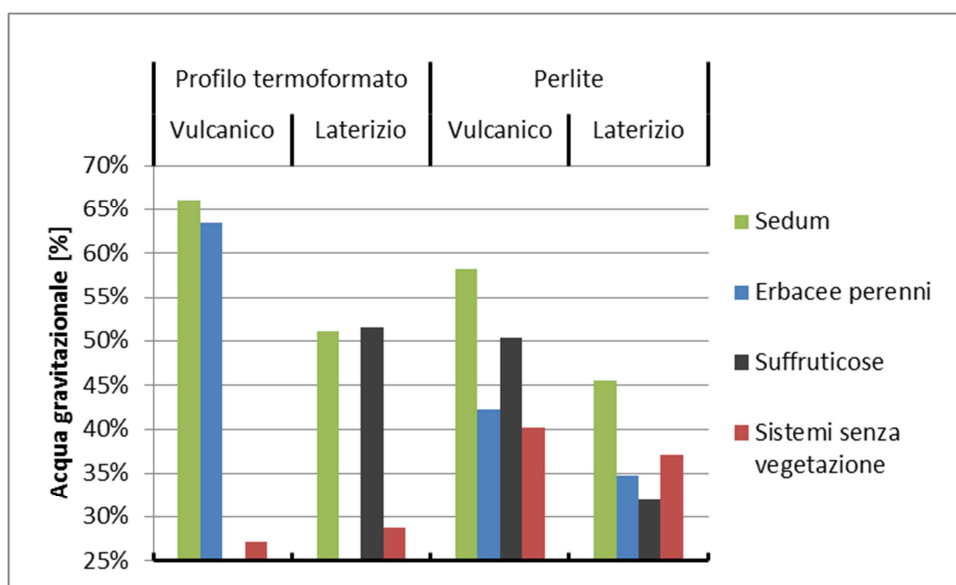


Figura 89: Valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione per tempo di ritorno di 2 anni

Per quanto riguarda le simulazioni con tempo di ritorno di 30 anni invece le differenze per sistemi senza vegetazione, come ben visibile in Figura 90, sono pressochè nulle.

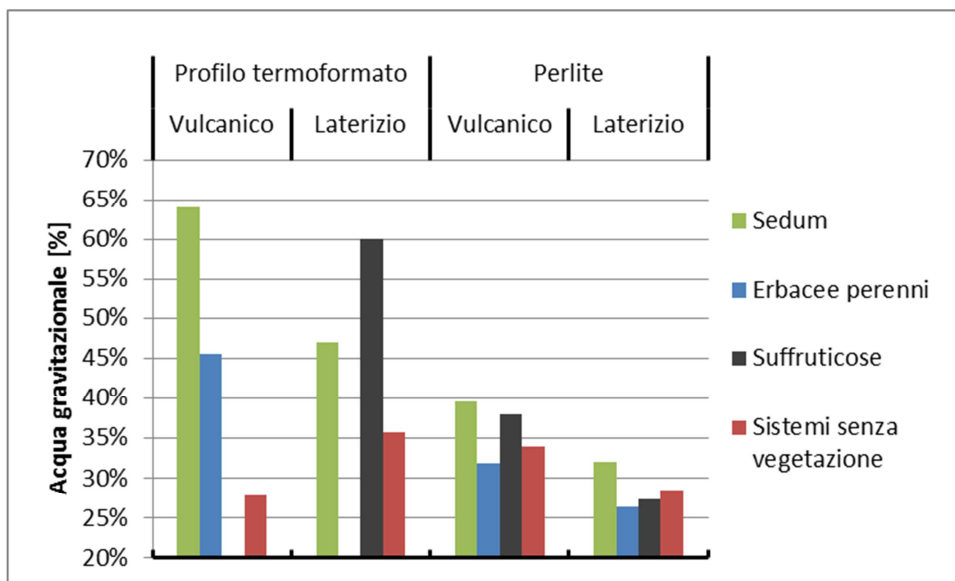


Figura 90: Valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione per tempo di ritorno di 30 anni

In Tabella 32 sono riportate le percentuali di acqua gravitazionale per i sistemi senza vegetazione, si può vedere come per il tempo di ritorno di 30 anni i sistemi con perlite trattengano meno acqua di pioggia mentre i sistemi con profilo termoformato aumentano le performance.

Tabella 32: Percentuali di acqua accumulata (gravitazionale) dai sistemi senza vegetazione rispetto alla pioggia totale

Substrato-drenante	Acqua gravitazionale [%]	
	senza vegetazione	
	TR 2 anni	TR 30 anni
VU-BA	27,2	27,9
VU-PI	40,2	34,0
ZN-BA	28,8	35,7
ZN-PI	37,0	28,5

In Tabella 33 sono state calcolate invece le differenze tra valori di acqua gravitazionale tra sistemi con e senza vegetazione si può notare come le differenze maggiori le abbiano i sistemi con profilo termoformato, che tuttavia possono essere dovute più all'effetto di ostruzione della fibra protettiva per compattamento che ad un loro effettivo miglioramento di prestazioni. Si nota come invece nei sistemi con perlite i valori siano più o meno analoghi con differenze minime tra sistemi con e senza vegetazione.

Tabella 33: Differenza tra valori di acqua accumulata (gravitazionale), in mm e percentuale, per sistemi con e senza vegetazione per i due tempi di ritorno

Campione			Δ Acqua gravitazionale [mm]		Δ Acqua gravitazionale [%]	
Substrato-drenante	Numero	Tipo di vegetazione	TR	TR	TR	TR
			2 anni	30 anni	2 anni	30 anni
VU-BA	11	A	6,6	10,9	39%	36%
	12	B	6,1	5,3	37%	18%
	32	C	8,9	15,7	53%	52%
VU-PI	34	A	2,8	1,9	17%	6%
	3	B	0,5	-0,8	3%	-3%
	6	C	1,7	1,2	10%	4%
ZN-BA	8	A	3,6	3,6	21%	12%
	19	B	7,5	12,2	45%	41%
	35	C	4,3	6,9	26%	23%
ZN-PI	13	A	1,3	1,1	8%	4%
	9	B	-0,3	-0,7	-2%	-2%
	7	C	-0,8	-0,4	-5%	-1%

Le differenze sono state riportate in due grafici, Figura 91 per il tempo di ritorno di 2 anni e Figura 92 per il tempo di ritorno di 30 anni, in cui si vede appunto l'aumento nei sistemi con profilo termoformato e la variabilità minima invece per i sistemi con perlite, che diminuisce ancora nelle simulazioni con tempo di ritorno di 30 anni.

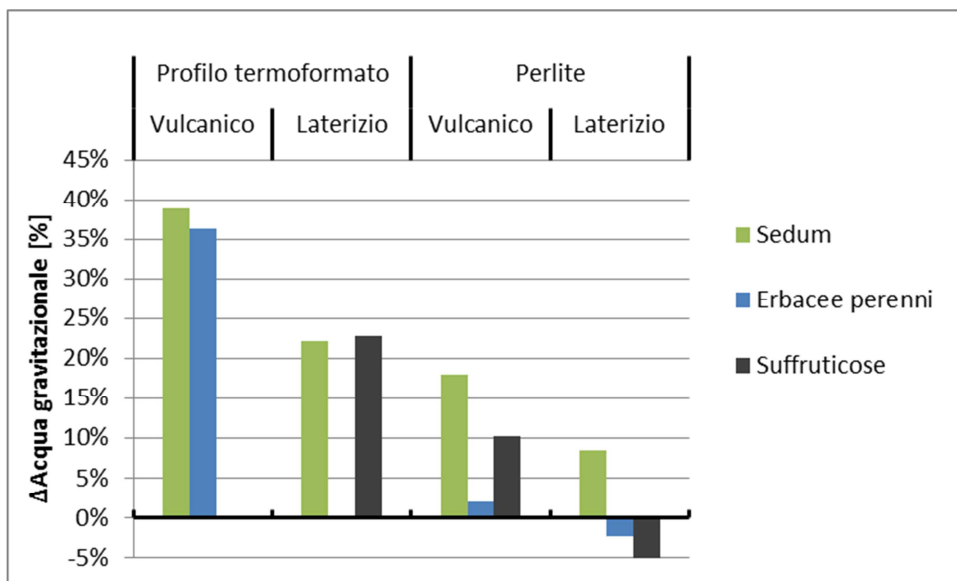


Figura 91: Differenza tra valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione per tempo di ritorno di 2 anni

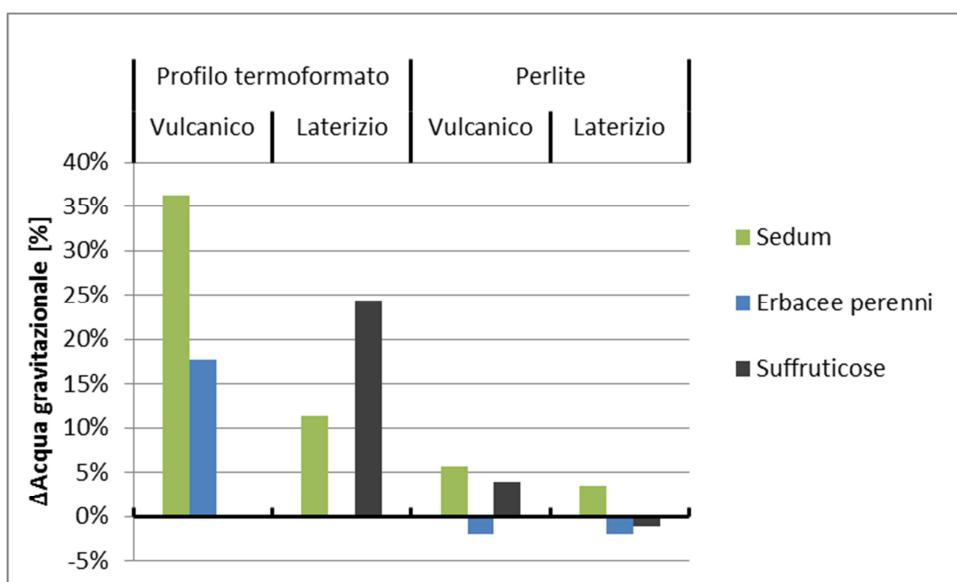


Figura 92: Differenza tra valori di acqua accumulata (gravitazionale) per sistemi con e senza vegetazione per tempo di ritorno di 30 anni

La considerazione che si può fare in questo caso è che la vegetazione non va ad aumentare la capacità del sistema di accumulare l'acqua in eccesso durante l'evento di pioggia che piuttosto è dettata dalle caratteristiche fisiche di substrato e drenante, a seconda della presenza o meno di macroporosità.

4.2.2 Curve Number

I valori di Curve Number ricavati dalle prove effettuate sui sistemi senza vegetazione sono riportati in Tabella 34. Si è preferito, per poterli confrontare più agevolmente con quelli di questo studio

considerarli come CN(III), in quanto ricavati dalla risposta di sistemi prossimi alla saturazione. I valori ricavati dalla regressione sono stati considerati per AMC(III), ovvero per le condizioni di umidità antecedenti critiche, mentre sono stati poi calcolati, come precedentemente fatto per i sistemi con vegetazione, i valori per AMC(II), ovvero per condizioni di umidità antecedenti medie.

Tabella 34: Valori di I, S e CN con relativi errori in condizioni di saturazione (AMCIII) e in condizioni idriche medie (AMCII) per i sistemi senza vegetazione

Campione	AMC(III)					AMC(II)	
	I [mm]	S [mm]	CN(III)	R ²	SE	S [mm]	CN(II)
ZN-PI	0,0	2,3	99,1	99,3	0,59	1,4	97,9
ZN-BA	0,2	5,4	97,9	100,0	0,16	15,6	95,3
VU-PI	0,0	6,7	97,4	97,0	1,07	12,6	94,2
VU-BA	0,0	0,6	99,8	99,9	0,24	5,3	99,5

Sono quindi stati confrontati con i valori dei sistemi con vegetazione (Tabella 35). In Figura 93 sono riportati i valori di S per le due varianti. Si può notare come se per i sistemi con vegetazione i valori di volume specifico di saturazione maggiori siano per le conformazioni con profilo termoformato, per quelli senza non vi erano differenze dovute particolarmente ad un componente.

Tabella 35: Valori di S e CN con AMC(II) per sistemi con e senza vegetazione

Campioni			Con vegetazione		Senza vegetazione		Differenze	
			S [mm]	CN(II)	S [mm]	CN(II)	ΔS [mm]	ΔCN
VU BA	11	A	60,8	81	1,4	99	59,4	18,8
	12	B	42,7	86			41,3	13,8
	32	C	147,1	63			145,7	36,1
VU PI	34	A	31,9	89	15,6	94	16,3	5,4
	3	B	20,4	93			4,8	1,7
	6	C	27,4	90			11,8	3,9
ZN BA	8	A	33,2	88	12,6	95	20,6	6,8
	19	B	146,7	63			134,1	31,9
	35	C	50,8	83			38,3	12,0
ZN PI	13	A	21,2	92	5,3	98	15,8	5,6
	9	B	15,4	94			10,1	3,7
	7	C	14,8	95			9,4	3,4

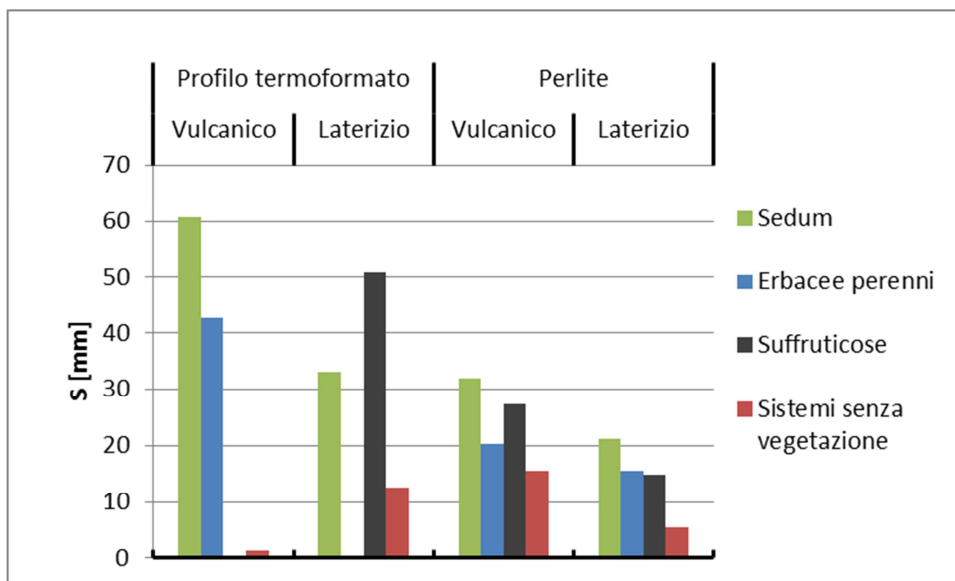


Figura 93: Confronto tra valori di S con AMC(II) di sistemi con e senza vegetazione

Allo stesso modo si possono vedere le differenze tra valori di CN, molto più elevati nel caso dei sistemi senza vegetazione (Figura 94). Le differenze maggiori anche qui si hanno nei sistemi con profilo termoformato.

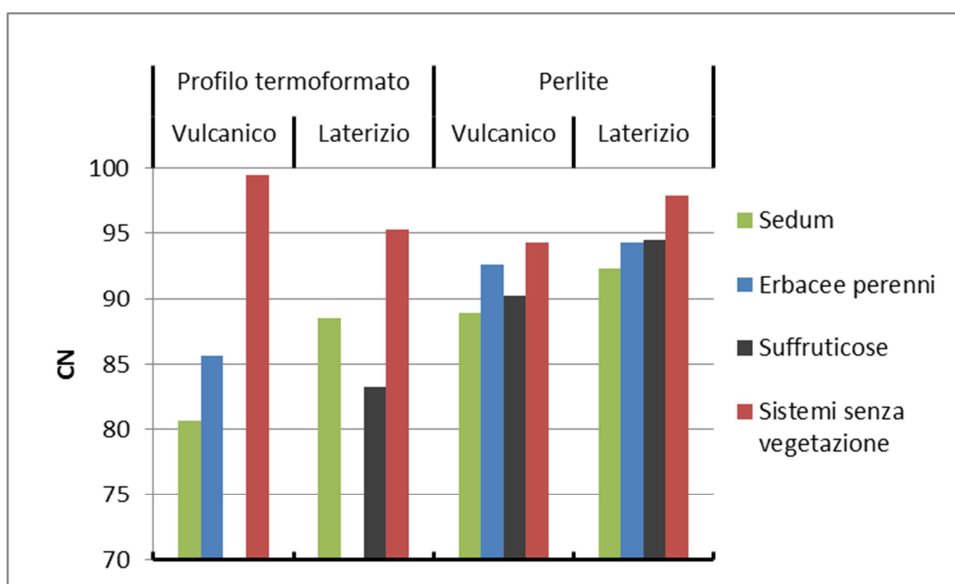


Figura 94: Confronto tra valori di CN(II) per sistemi con e senza vegetazione

Si può concludere con la considerazione che la vegetazione dunque è in grado di abbassare nettamente i valori di curve number, considerato che i valori medi secondo la tipologia di vegetazione, 88 per i microcosmi con Sedum, 89 per quelli con suffruticose e 91 per quelli con erbacee perenni, si discostano dal valore medio di 97 dei soli substrati e drenanti. Inoltre l'effetto che il tempo può aver avuto sul sistema è da indagare.

4.3 Confronto con dati di letteratura

Si è quindi fatto qualche confronto con studi simili di settore in particolare sull'effetto che ha la tipologia di vegetazione sulle performance del verde pensile e sui valori di curve number ricavati per sistemi simili a quelli di studio.

4.3.1 Comportamento idrologico e tipologia di vegetazione

Dunnett et al. (2008) si propone di isolare e quantificare il ruolo della vegetazione nella performance di un sistema di tetto verde. Imposta dunque due sperimentazioni, una in campo e una in serra, con lo scopo di analizzare il comportamento idrologico di microcosmi in relazione alle tipologie di vegetazione utilizzate. I microcosmi sono composti con diverse specie di vegetazione in purezza (*Festuca ovina*, *Leontodon hispidus*, *Carex flacca*) e in miscuglio secondo il seguente elenco:

- Miscuglio 1: *F. ovina*, *Koeleria macrantha*, *Helictotrichon pretense*, *Briza media* (grass species)
- Miscuglio 2: *C. flacca*, *C. panicea*, *C. caryophyllea*, *C. pulicaris* (sedge species)
- Miscuglio 3: *L. hispidus*, *Succisa pratensis*, *Campanula rotundifolia*, *Viola riviniana* (forb species)
- Miscuglio misto: composto da tutte le specie precedentemente elencate

Dalla prima sperimentazione non evince uno schema di variazione del comportamento specifico per la tipologia di vegetazione altresì individua una variazione stagionale nella formazione di deflusso dai vari campioni. In particolar modo d'estate quando le precipitazioni sono intermittenti e minori nota delle differenze, attribuite principalmente alla struttura della parte aerea della vegetazione. Infatti il campione costituito dalla monocoltura di *Leodonton hispidus* è caratterizzato da un minor deflusso, seguito dal miscuglio 3. Dunnett et al. (2008) commenta come sia possibile che la densa rosetta di foglie larghe e piatte del *L. hispidus* vadano a coprire il substrato e il fatto di avere una crescita rapida garantisca una maggiore intercettazione della precipitazione rispetto ad altre specie.

Nella seconda sperimentazione in serra invece vengono simulate due intensità di pioggia, una di 5 mm/h ed una di 10 mm/h. Il tempo di simulazione è di 15 minuti. La configurazione del simulatore è molto simile a quella utilizzata nelle sperimentazioni con solo substrato e drenante. Le specie utilizzate sono diverse dalle precedenti; l'elenco con la descrizione delle è visibile in Tabella 36.

Tabella 36: Elenco e caratteristiche delle specie utilizzate da Dunnett et al. (2008) nella seconda sperimentazione (tratto da Dunnett et al. 2008)

Plant name	Plant type	Leaves
<i>Armeria maritima</i> ssp <i>maritima</i>	Forb	Dense rosettes of linear leaves
<i>Leontodon hispidus</i>	Forb	Broadly ovate
<i>Prunella vulgaris</i>	Forb	Broadly ovate, spreading and vigorous growth
<i>Silene uniflora</i>	Forb	Fleshy, lance shaped leaves
<i>S. acre</i> 'Minor'	Sedum	Erect or trailing stems densely clothed in overlapping, triangular leaves
<i>S. album</i> 'Coral carpet'	Sedum	Glabrous green, creeping stem forming large mats, small ovoid-globose to cylindrical leaves
<i>S. rupestre</i>	Sedum	Alternate, pointed, cylindrical leaves. Upright, leafy woody stems
<i>S. spurium</i> 'Coccineum'	Sedum	Upright, branching red stems bearing opposite, ovate, toothed leaves
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Grass	Tufted, culms erect or spreading, stout and smooth leaves
<i>Festuca ovina</i>	Grass	Density tufted, culms erect or spreading, very slender, stiff, narrowly linear, smooth leaves
<i>Koeleria macrantha</i>	Grass	Densely tufted, forming a compact mound of narrowly linear, hairy leaves
<i>Trisetum flavescens</i>	Grass	A loosely tufted, culms erect or spreading, slender, rather weak, unbranched

In queste prove risultano produrre un minor deflusso i campioni con miscuglio di graminacee, seguiti dalle erbacee perenni e poi dai Sedum. Anche nel caso della monocoltura come migliore si ha l'*Anthoxanthum odoratum* seguito da *Silene uniflora* e *Trisetum flavescens*.

Viene inoltre trovata una correlazione negativa tra l'altezza delle piante e la quantità di deflusso generato e anche tra il peso secco medio delle radici e il volume medio di deflusso (Figura 95). Questo viene giustificato dalla ricerca per il fatto che un fitto sistema radicale possa trattenere più acqua rispetto a un sistema radicale meno fitto.

Tuttavia non si evince una relazione significativa tra il peso secco della parte aerea della vegetazione e la quantità di deflusso, per questo Dunnett et al. (2008) suggerisce come in realtà la struttura della pianta sia più importante per l'intercettazione della pioggia rispetto alla sua crescita.

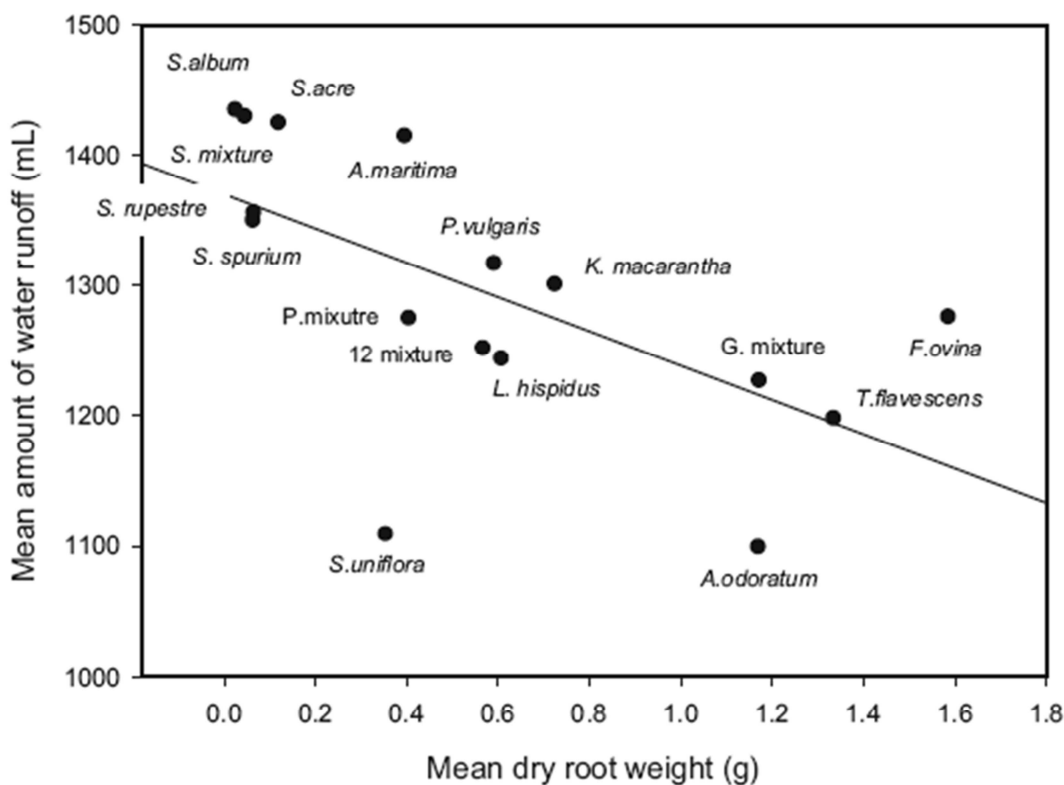


Figura 95: Rapporto tra il peso medio secco dell'apparato radicale e la quantità di deflusso per la simulazione con intensità più elevata (tratto da Dunnett et al. 2008)

Nel presente caso di studio tuttavia, essendo le precipitazioni simulate molto più intense, la parte aerea delle piante pare non avere un grosso impatto sulla quantità di deflusso, che invece potrebbe essere maggiormente influenzato dallo sviluppo dell'apparato radicale. In quest'ottica si potrebbe spiegare il Sedum come tipologia di vegetazione più performante, presumendo che la sua caratteristica di formare uno strato di radici superficiali molto denso vada ad influire sul rallentamento del deflusso durante l'evento di pioggia in condizioni di umidità già critiche. Allo stesso motivo si potrebbero imputare gli elevati valori di intercettazione ricavati con il modello CN-SCS dei microcosmi con Sedum, considerando in particolare i valori delle composizioni con drenante perlite. Tenendo comunque conto del fatto che la trattenuta d'acqua dipende essenzialmente da substrato, drenante e strato protettivo.

Un'altro studio interessante sempre condotto dall'Università di Sheffield è quello di Stovin et al. (2015).

In questo caso sono state fatte prove su tre diversi substrati e tre diversi miscugli di vegetazione: Sedum, prato naturale e non vegetato. La sperimentazione è di campo e i dati sono raccolti in un periodo di 4 anni. I sistemi di tetto verde sono estesivi con una profondità di 8 cm. L'obiettivo è stabilire quanto il substrato e la differente vegetazione influiscano sulle performance idrologiche del

sistema, in termini di *retention*, ovvero di ritenzione idrica, e di *detention*, ovvero di dilazione e attenuazione del deflusso dell'evento di pioggia.

I substrati sono di tre tipi. Due costituiti da laterizio riciclato, il primo (denominato HLS) meno permeabile (0,3-30 mm/min) e con un maggiore volume d'acqua contenibile (50% del volume) mentre il secondo (denominato SCS) con maggiore permeabilità (60-400 mm/min) e un volume d'acqua contenibile di 28%. Il terzo (denominato LECA) invece è costituito da argilla espansa (80%), terreno argilloso (10%) e compost (10%).

Per tutti e tre i tipi di vegetazione l'effetto del substrato scelto è il medesimo: i due substrati con laterizio riciclato garantiscono valori maggiori di ritenzione rispetto ai LECA (Figura 96). Come anche i campioni vegetati offrono i livelli maggiori di ritenzione rispetto a quelli non vegetati. Sembra comunque che il substrato abbia una maggiore influenza sulla ritenzione rispetto alla vegetazione.

Le performance peggiori sono date dalla combinazione con substrato più permeabile e poroso senza vegetazione.

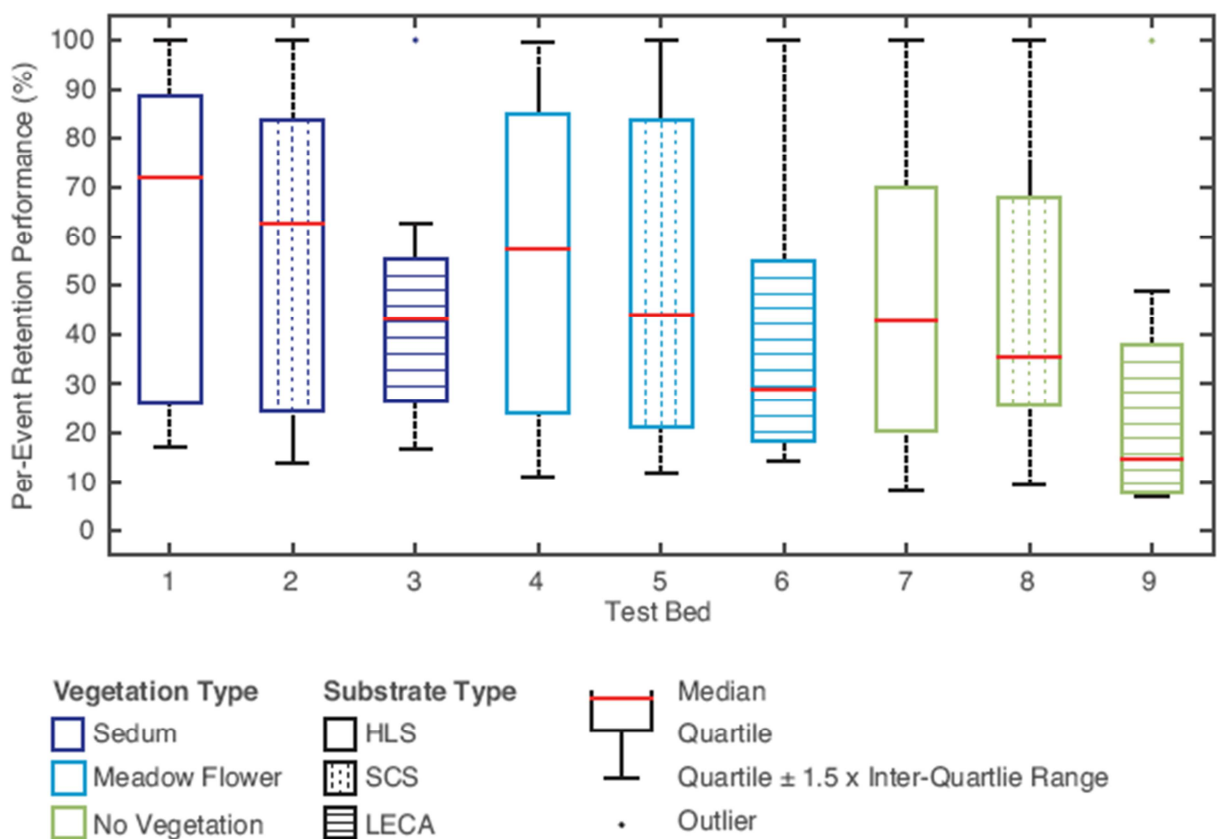


Figura 96: Performance di ritenzione idrica per eventi con P>10 mm (tratto da Stovin et al. 2015)

Senza la vegetazione la *retention* è tipicamente minore rispetto alle configurazioni con vegetazione, con il 21% in meno rispetto al sistema con prato naturale, 24,8 mm di pioggia.

Questi valori rispecchiano abbastanza le differenze tra i campioni con vegetazione e quelli senza del presente studio, che hanno variazioni massime di 30,8 mm per il sistema VU-PI con Sedum e di 30,1 mm nel caso di ZN-PI con suffruticose.

Per quanto riguarda invece l'attenuazione del picco di deflusso (Figura 97) si nota come sistemi con miscuglio di specie di prato naturale abbiano performance idrologiche pari a quelli con Sedum, anzi in alcuni casi minori (Figura 98).

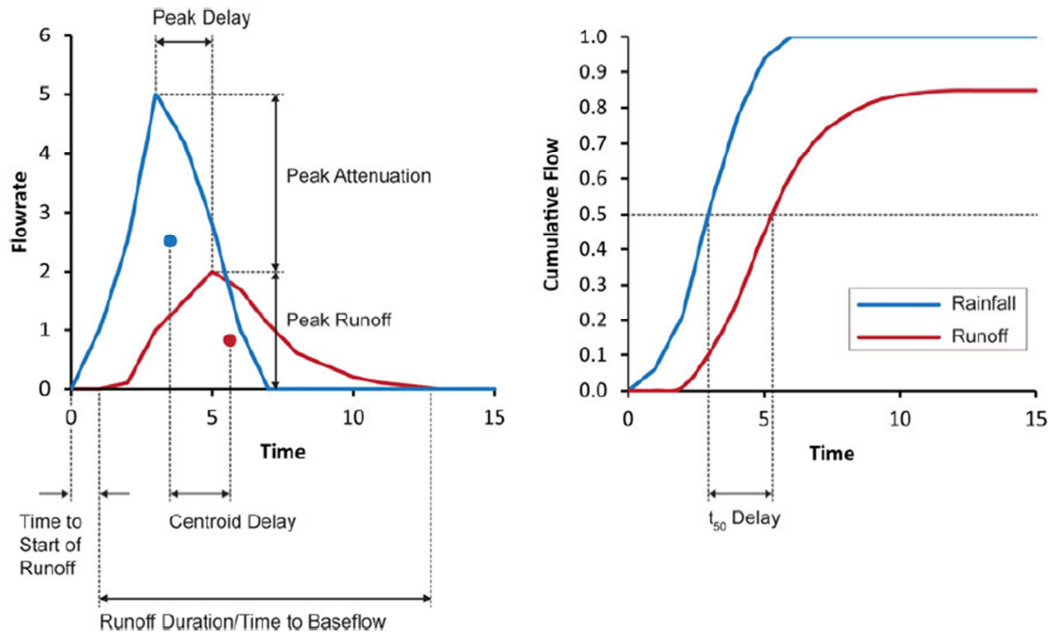
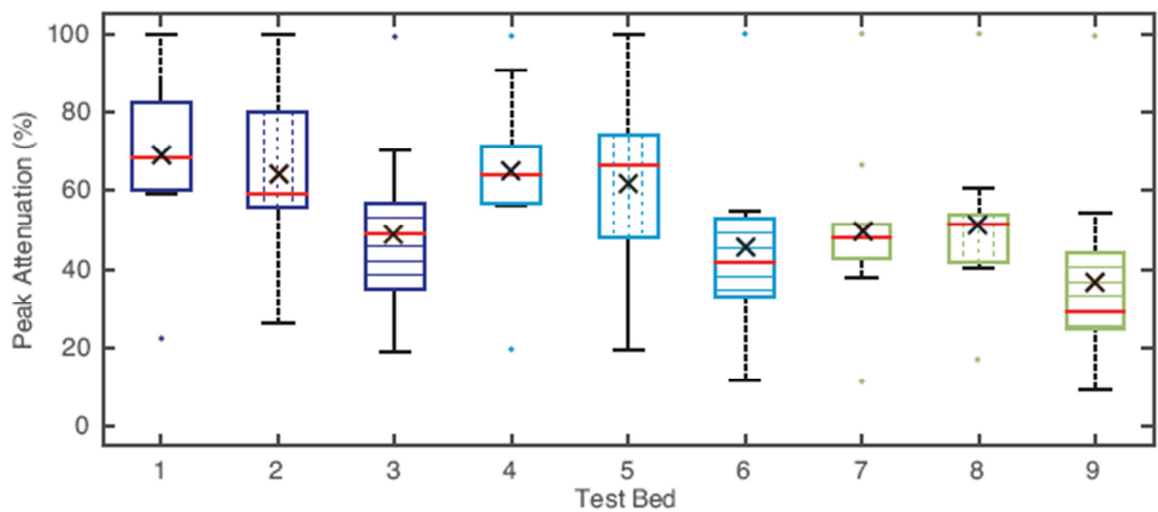


Figura 97: Valori di detenzion, qui viene considerato il picco di attenuazione del deflusso (tratto da Stovin et al. 2015)



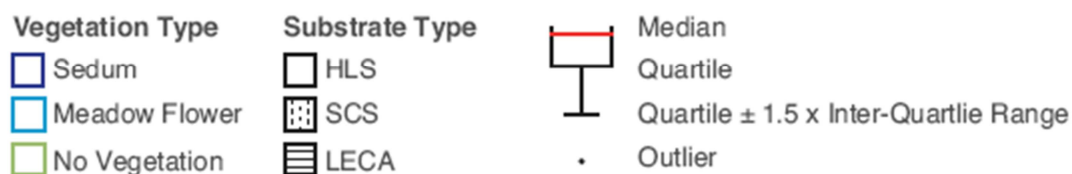


Figura 98: Picco di attenuazione del deflusso per eventi con $P > 10$ mm. Il picco è basato su step di 5 minuti (tratto da Stovin et al. 2015)

Le differenze nelle performance di *detention* tra i sistemi con vegetazione riflettono anche i loro diversi e contrastanti tipi di apparato radicale.

Il miscuglio di specie di prato contiene infatti specie che hanno un apparato radicale più profondo rispetto allo strato di radici superficiali fibrose del Sedum (Snodgrass e Snodgrass 2006). La moria delle radici può portare alla creazione di linee di scorrimento preferenziali e questo effetto ci può aspettare che sia più evidente nelle specie con sviluppo stagionale (non sempreverdi), come le specie di prato. Per cui in questi la velocità di deflusso potrebbe essere maggiore proprio a causa della presenza di macropori creati dalle radici morte (Schwen et al. 2011). Qualunque riduzione della porosità ci si aspetta che si rifletta in una riduzione della permeabilità e conseguentemente in un aumento della *detention*.

Questo potrebbe giustificare anche nel presente studio il fatto che le erbacee perenni, pur avendo delle percentuali di copertura maggiori, influiscano meno sia sulla capacità di ritenzione idrica che sulla trattenuta d'acqua durante l'evento di pioggia.

Questo studio di Stovin et al. (2015) conclude sottolineando come vi sia la necessità di una più approfondita ricerca per caratterizzare meglio le interazioni tra substrato, apparato radicale e umidità, con ricerche più mirate alla zona delle radici per vedere come queste interazioni provide critical controls sia sulle performance di *retention* che su quelle di *detention*.

4.3.2 Curve Number

Carter e Rasmussen (2006) hanno monitorato le performance di un sistema di tetto verde estensivo con pendenza minore al 2% e 7,62 cm di substrato, la stratigrafia è visibile in Figura 99.

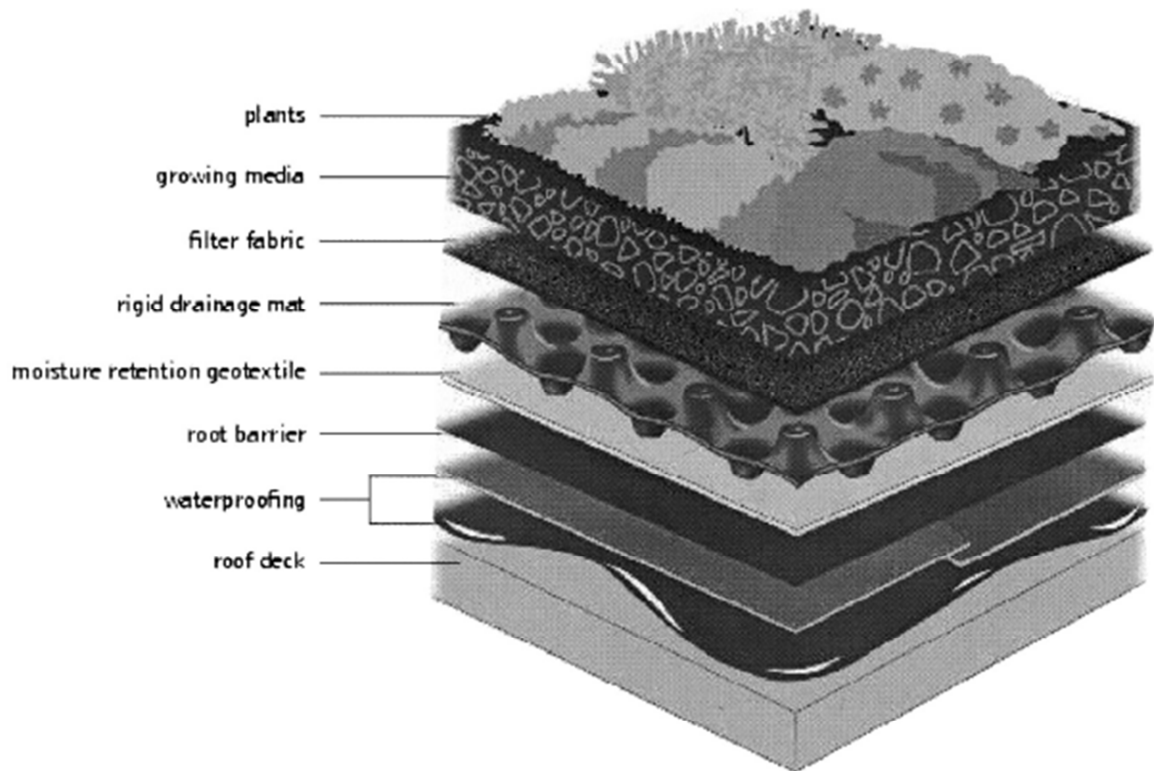


Figura 99: Strafigrafia del tetto verde estensivo monitorato da Carter e Rasmussen (2006) (tratto da Carter e Rasmussen 2006)

Il substrato è apposito per sistemi di verde pensile estensivo, composto da 55% di ardesia espansa, 30% di sabbia e 15% di sostanza organica, con porosità totale del 50,6%.

Lo strato di accumulo e drenaggio è rigido, simile al profilo termoformato utilizzato in questo studio.

La vegetazione è composta da un miscuglio di *Sedum album* 'Murale', *Sedum album* 'Jellybean', *Sedum kamtschaticum*, *Sedum sexangulare*, *Delosperma nubigenum* e *Delosperma cooperi*.

Carter e Rasmussen (2006) trovano un curve number di 86 con S di 42,7 mm.

Getter et al. (2007) analizza il deflusso da 12 campioni di verde pensile estensivo costruiti a diverse pendenze (2%, 7%, 15% e 25%). Gli eventi di pioggia considerati sono leggeri (<2,0 mm) medi (2,0–10,0 mm) e forti (>10,0 mm). I campioni sono costituiti dagli strati classici di un tetto verde commerciale, inclusi isolante, strato protettivo e membrana impermeabile.

Il substrato ha profondità di 6 cm, le caratteristiche sono riportate in Tabella 37.

Tabella 37: Caratteristiche del substrato utilizzato da Getter et al. (2007) (tratto da Getter et al. 2007)

Component	Unit
Total sand (%)	91.18
Very coarse sand (1–2 mm) (%)	21.96
Coarse sand (0.5–1 mm) (%)	40.80
Medium sand (0.25–0.5 mm) (%)	24.66
Fine sand (0.10–0.25 mm) (%)	3.36
Very fine sand (0.05–0.10 mm) (%)	0.40
Silt (%)	5.60
Clay (%)	3.22
Bulk density (g/cm ³)	1.16
Pore space (%)	41.41
Air filled porosity (%)	21.43
Water holding capacity at 0.01 MPa (%)	17.07

Anche in questo caso le specie utilizzate sono costituite prevalentemente da *Sedum*, con una eccezione: *Saxifraga granulata* L., *Sedum acre* L., *Sedum album* L., *Sedum kamtschaticum* Fisch., *Sedum pulchellum* Michx., *Sedum reflexum* L., *Sedum spurium* Bieb. ‘Coccineum’, *Sedum spurium* Bieb. ‘Summer Glory’.

Getter et al. (2007) calcola dei curve number di 84, 87, 89 e 90 rispettivamente per le pendenze di 2%, 7%, 15% e 25%. Tutti i valori sono inferiori al curve number di 98 della superficie di tetto tradizionale. I valori di S variano da 28,2 mm a 48,4 mm.

Per un confronto vengono considerati i valori per la pendenza del 2%.

Alfredo et al. (2010) descrive i risultati di una serie di simulazioni del comportamento idrologico dei tetti verdi in relazione a diverse condizioni di precipitazione. Le intensità di pioggia simulate variano tra 0,3 e 0,42 mm/min. Il substrato utilizzato è minerale mescolato a composto organico. In Figura 100 una rappresentazione della stratigrafia utilizzata.

La vegetazione utilizzata è un miscuglio di diverse specie di *Sedum*.

Alfredo et al. (2010) calibra un curve number di 92 (S=22,1 mm).

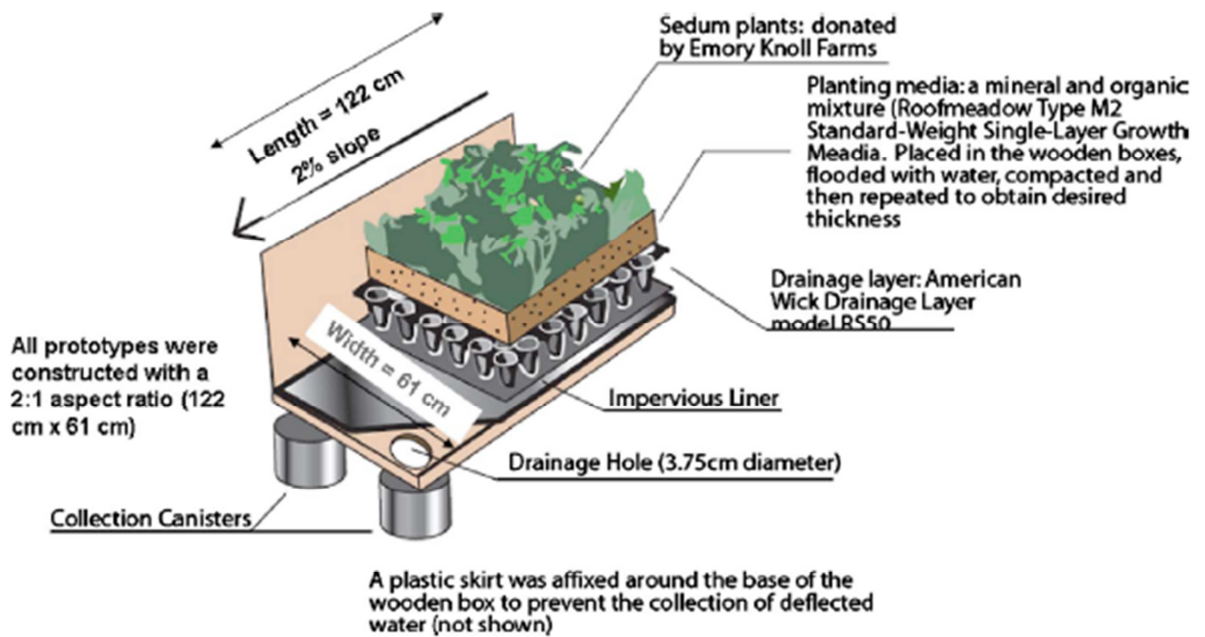


Figura 100: Esempificazione della configurazione del campione di tetto verde utilizzato da Alfredo et al. (2010) (tratto da Alfredo et al. 2010)

In ultimo Fassman-Beck et al. (2016) riporta ed analizza una serie di dati raccolti da numerosi siti e considera anche la variabilità climatica (Tabella 38). Il valore riportato per Csa è ricavato da dati raccolti a Genova e perciò si è considerato questo valore di CN per un confronto.

Tabella 38: Valori di CN per diversi siti suddivisi secondo il clima (C=warm temperate; D=snow; f=fully humid; s=summer dry; a=hot summer; b=warm summer; c=cool summer)

Köppen Geiger climate zone ^a	Median CN	Mean CN
Cfa	92	91
Cfb	89	89
Csa	92	92
Csb	80	80
Dfa	91	90
Dfb/Cfa	96	96

In Tabella 39 è proposto un riassunto dei dati ricavati dai vari studi precedentemente descritti e dei valori medi di CN per microcosmi con medesima tipologia di vegetazione.

Tabella 39: Riassunto dei valori di CN e relativi valori di S riportati dagli studi di letteratura analizzati e media dei valori di CN per sistemi con stessa vegetazione

Studi	CN	S [mm]
Carter e Rasmussen (2006)	86	42,7
Getter et al. (2007)	84	48,4
Alfredo et al. (2010)	92	22,1

Fassman-Beck et al. (2016)	92	22,1
Tipo di vegetazione		
Sedum (A)	88	36,0
Erbacee perenni (B)	91	25,7
Suffruticose (C)	89	30,2

Confrontando questi valori con quelli ottenuti dall'analisi dei dati su sistemi con vegetazione possiamo notare come i valori calcolati di CN per i microcosmi di studio siano all'interno del range proposto dagli altri studi di settore.

6. CONCLUSIONI

Considerando le differenze rilevate tra le diverse combinazioni di microcosmi nella gestione dei volumi di pioggia durante eventi meteorici di diversa intensità in condizioni critiche di umidità del suolo (massima capacità di ritenuta idrica), la vegetazione che sembra aver prodotto i risultati migliore è quella composta dal mix di Sedum mentre il substrato vulcanico è risultato il substrato ideale per le condizioni climatiche della pianura veneta. Senza considerare i due outlier, lo strato di accumulo e drenaggio migliore risulta il profilo termoformato, anche se non è certo che questo sia più dovuto all'intasamento dello strato protettivo in feltro e/o all'otturazione dei fori di drenaggio.

I valori massimi di trattenuta idrica durante l'evento variano dal 45% al 66% per eventi con intensità di pioggia minore (tempo di ritorno di 2 anni) mentre da 32% a 64% per le intensità maggiori (tempo di ritorno di 30 anni). I risultati confermano, come prevedibile, che la trattenuta idrica è minore per intensità di pioggia più elevate. I dati sulla velocità di deflusso vanno a ribadire quanto precedentemente detto.

Nel caso del tempo di ritorno di 2 anni si sono potute notare delle differenze più o meno marcate tra le diverse vegetazioni, mentre con le precipitazioni di intensità maggiore le differenze si appianano e i sistemi hanno le medesime performance. Questo si può sicuramente affermare per i sistemi con strato di accumulo e drenaggio di perlite; mentre, per i sistemi con profilo termoformato, l'incidenza della vegetazione sul sistema è molto bassa; è più probabile invece che le marcate differenze traggano origine proprio dal problema della conformazione dello strato protettivo. Lo stesso ragionamento vale per le velocità di drenaggio.

Analizzando le capacità di ritenzione idrica dei sistemi invece emerge che, per quanto il Sedum sia sempre migliore, tranne nel caso della conformazione laterizio-perlite in cui prevale il miscuglio a suffruticose, le performance più elevate sono state ottenute con il riciclato con laterizio e lo strato di accumulo e drenaggio in perlite espansa. Le capacità di ritenzione idrica variano abbastanza passando da 47,7 mm, per il campione con la vegetazione meno sviluppata e più stentata, a un massimo di 87 mm.

I valori di Curve Number rispecchiano il comportamento dei microcosmi durante le simulazioni di pioggia e quindi i valori di trattenuta idrica, confermando che i sistemi con Sedum sono quelli con CN più basso (media di 88); in particolare, le combinazioni con substrato vulcanico e profilo termoformato hanno evidenziato avere CN minori. Seguono, quindi, le suffruticose (CN=89), mentre i valori più elevati si sono riscontrati per le erbacee perenni (CN=91).

Confrontando i valori di CN con quelli precedentemente ottenuti negli stessi sistemi senza vegetazione, inoltre, si è evidenziato un notevole abbassamento dei valori, che prima variavano da 94 a 99. Lo stesso si evince dal confronto tra le capacità di ritenzione idrica, in cui la variazione

raggiunge un massimo di 31,1 mm di capacità aggiuntiva per il sistema laterizio-perlite. Miglioramenti altrettanto notevoli ci sono stati nei sistemi vulcanico-perlite, minori invece nei sistemi con profilo termoformato.

Comunque si nota, sia dall'analisi dei grafici di accumulo e deflusso e di velocità di drenaggio sia dai valori di CN ricavati, che la vegetazione ha un ruolo importante all'interno del sistema nella riduzione dei deflussi.

La vegetazione è quindi una componente fondamentale in un tetto verde in quanto effettivamente influisce in modo positivo sui livelli di ritenuta idrica dell'intero sistema. I risultati evidenziano che più presumibilmente l'effetto è legato all'apparato radicale delle piante piuttosto che all'apparato aereo; infatti, soprattutto per eventi di pioggia in condizioni critiche di saturazione, quest'ultimo non pare essere molto influente visto i risultati relativi alla quantità d'acqua trattenuta. Esempificativo è il fatto che i microcosmi con le erbacee perenni, nonostante le elevate coperture, siano generalmente quelli con valori più bassi di capacità di ritenzione idrica.

I risultati evidenziano anche che un fattore interessante da indagare è il cambiamento nel tempo delle caratteristiche idrauliche dei diversi elementi di un tetto verde, legato al compattamento dei substrati e alla permeabilità degli strati protettivi e di accumulo e drenaggio, che in particolare per il profilo plastico termoformato e il relativo feltro protettivo si è dimostrato suscettibile a elevate modifiche.

In conclusione si può affermare che questo lavoro di tesi ha confermato che la vegetazione è un elemento essenziale per la caratterizzazione dell'intero sistema di verde pensile. Non si possono infatti considerare come fondamentali nella mitigazione del deflusso solo il substrato e lo strato di accumulo e drenaggio.

BIBLIOGRAFIA

Abram, P. 2006. *Verde pensile in Italia e in Europa*. Milano: Il verde editoriale.

AIVEP. 2013. La legge 10/2013. Available at: <http://www.aivep.it/la-legge-10-2013>. Accessed 3 ottobre 2017.

Alfredo, K., F. Montalto and A. Goldstein. 2010. Observed and Modeled Performances of Prototype Green Roof Test Plots Subjected to Simulated Low- and High-Intensity Precipitations in a Laboratory Experiment. *Journal of Hydrologic Engineering* 15(6): 444-457.

ARPAV. 2011. Il clima in Veneto Available at: <http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/climatologia/approfondimenti/il-clima-in-veneto>. Accessed 4 ottobre 2017.

Bauder S.r.l. 2015a. Scheda prodotto Bauder FSM 1100. www.bauder.it

Bauder S.r.l. 2015b. Sistemi per tetti verdi: Panoramica prodotti. www.bauder.it

Bauder S.r.l. 2010. Scheda prodotto Bauder DSE 40. www.bauder.it

Bengtsson, L., L. Grahn and J. Olsson. 2005. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrology* 36(3): 259.

Benvenuti, S. and D. Bacci. 2010. Initial agronomic performances of Mediterranean xerophytes in simulated dry green roofs. *Urban Ecosystems* 13(3): 349-363.

Berndtsson, J. C., L. Bengtsson and K. Jinno. 2009. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering* 35(3): 369-380.

Berretta, C., S. Poë and V. Stovin. 2014. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology* (511): 374-386.

Carter, T. L. and T. C. Rasmussen. 2006. Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association* 42(5): 1261-1274.

Crockford, R. H. and D. P. Richardson. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14(16-17): 2903-2920.

Dalla Fior, G. 1985. *La nostra flora: guida alla conoscenza della flora della regione Trentino-Alto Adige*. 3. ed ed. Trento: G. B. Monauni.

DPR n.59/2009. 2009. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia.

Dunnett, N. and N. Kingsbury. 2008. *Planting green roofs and living walls*. Revised and update edition ed. Portland: Timber press.

Dunnett, N., A. Nagase, R. Booth and P. Grime. 2008. Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosystems* 11(4): 385-398.

Dvorak, B. and A. Volder. 2010. Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. *Landscape and Urban Planning* 96(4): 197-213.

Europomice S.r.l. 2017. Scheda prodotto Vulcaflor. www.europomice.it

Fassman-Beck, E., R. Berghage, T. Kurtz, D. Carpenter, V. Stovin, W. Hunt and B. Wadzuk. 2016. Curve Number and Runoff Coefficients for Extensive Living Roofs. *Journal of Hydrologic Engineering* 21(3): 04015073.

Fioretti, R., A. Palla, L. G. Lanza and P. Principi. 2010. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment* 45(8): 1890-1904.

Francis, R. A. and J. Lorimer. 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management* 92(6): 1429-1437.

Getter, K. L., D. B. Rowe and J. A. Andresen. 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering* 31(4): 225-231.

Giacomello, E. 2012. *Copertura a verde e risorsa idrica : implicazioni tecnologiche e benefici per l'ambiente urbano*. Milano: Angeli.

ISPRA. 2012. Verde pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico. *ISPRA, Manuali e Linee Guida* 78/ 2012.

Kolb, W. and T. Schwarz. 1986. Zum Klimatisierungseffekt von Pflanzenbeständen auf Dächern, Teil I. *Zeitschrift für Vegetationstechnik re-published in Veitshoechheimer Berichte, Heft 39, 'Dachbegrünung'*(9). In: Dunnett, N., A. Nagase, R. Booth and P. Grime. 2008. Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosystems* 11(4): 385-398.

Legge n.10/2013. 2013. Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani.

McPherson, E. G. 1994. Cooling urban heat islands with sustainable landscapes. In: Platt, Rutherford H.; Rowntree, Rowan A.; Muick, Pamela C.; eds. *The ecological city: preserving and restoring urban biodiversity*. Amherst, MA: University of Massachusetts Press: 151-171.

Mentens, J., D. Raes and M. Hermy. 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77(3): 217-226.

Monterusso, M. A., D. B. Rowe, C. L. Rugh and D. K. Russell. 2004. Runoff water quantity and quality from green roof systems. *Acta Horticulturae*(639): 369-376. In: Palla, A., I. Gnecco and L. G. Lanza. 2010. Hydrologic Restoration in the Urban Environment Using Green Roofs. *Water* 2(2): 140-154.

Oberndorfer, E., J. Lundholm, B. Bass, R. R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnett, S. Gaffin, M. Köhler, K. K. Y. Liu and B. Rowe. 2007. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience* 57(10): 823-833.

Palla, A., I. Gnecco and L. G. Lanza. 2012. Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof. *Hydrological Processes* 26(1): 73-84.

Palla, A., L. G. Lanza and P. and La Barbera. 2008. A green roof experimental site in the Mediterranean climate. In *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.

Palla, A., J. J. Sansalone, I. Gnecco and L. G. Lanza. 2011. Storm water infiltration in a monitored green roof for hydrologic restoration. *Water Science and Technology* 64(3): 766-773.

Palla, A., I. Gnecco and L. G. Lanza. 2010. Hydrologic Restoration in the Urban Environment Using Green Roofs. *Water* 2(2): 140-154.

Pallavicini, M. and V. Terzo. 1986. *I fiori del Parco Ticino*. Milano: Fabbri.

Perlite Italiana S.r.l. 2010a. Scheda prodotto Ecodren SD5. www.perlite.it

Perlite Italiana S.r.l. 2010b. Scheda prodotto Igroperlite. www.perlite.it

Salchegger, H. 2006. Le specie vegetali più idonee e i criteri di progettazione del verde. In: *Verde pensile in Italia e in Europa*, 73-101. ed. P. Abram, Milano: Il Verde Editoriale S.r.l.

Schwen, A., Bodner, G., Scholl, P., Buchan, G.D., Loiskandl, W., 2011. Temporal dynamics of soil hydraulic properties and the water-conducting porosity under different tillage. *Soil Tillage Res.* 113 (2), 89–98 In: Stovin, V., S. Poë, S. De-Ville and C. Berretta. 2015b. The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering* (85): 159-172

Simonato A. 2014. Gestione sostenibile dei deflussi di pioggia nella pianura veneta: risultati preliminari dei microcosmi di tetto verde ad Agripolis. Relatore Bortolini L. Correlatori Bettella F. Zanin G. Dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova, Legnaro.

Snodgrass, E. C. and L. L. Snodgrass. 2006. *Green roof plants: A resource and planting guide*. Portland, Or: Timber Press.

Spohn, M. and R. Spohn. 2013. *Riconoscere i fiori spontanei d'Italia e d'Europa*. Roma: Ricca editore.

Stewart, H., S. Owen, R. Donovan, R. MacKenzie, N. Hewitt, U. Skiba and D. Fowler. 2002. Trees & Sustainable Urban Air Quality: Using trees to improve air quality in cities. *Department of Environmental Science, Institute of Environmental and Natural Science, Lancaster University*.

Stovin, V., G. Vesuviano and S. De-Ville. 2015a. Defining green roof detention performance. *Urban Water Journal*.

Stovin, V. 2010. The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. *Water and Environment Journal* 24(3): 192-199.

Stovin, V., G. Vesuviano and H. Kasmin. 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology* (414–415): 148-161.

Stovin, V., S. Poë, S. De-Ville and C. Berretta. 2015b. The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering* (85): 159-172.

susDrain. 2012. Sustainable drainage. Available at: http://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/background/sustainable-drainage.html#_. Accessed 3 ottobre 2017.

Sutton, R. 2015. *Green Roof Ecosystems*. Springer International Publishing.

U.S. Environmental Protection Agency. 2008. Reducing urban heat islands: Compendium of strategies. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.

Ulrich, R. S. 1986. Human responses to vegetation and landscapes. *Landscape and Urban Planning* 13(Supplement C): 29-44. In: Dunnett, N. and N. Kingsbury. 2008. *Planting green roofs and living walls*. Revised and update edition ed. Portland: Timber press.

VanWoert, N. D., D. B. Rowe, J. A. Andresen, C. L. Rugh, R. T. Fernandez and L. Xiao. 2005. Green Roof Stormwater Retention. *Journal of Environmental Quality* 34(3): 1036-1044.

Vesuviano, G., F. Sonnenwald and V. Stovin. 2013. A two-stage storage routing model for green roof runoff detention. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 69(6): 1191.

Yio, M. H. N., V. Stovin, J. Werdin and G. Vesuviano. 2013. Experimental analysis of green roof substrate detention characteristics. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 68(7): 1477-1486.

ZinCo Italia S.r.l. 2012. Scheda prodotto Zinco terra "Roccia fiorita". www.zinco.it