

**POLITECNICO DI MILANO**

**Facoltà di Ingegneria Civile Ambientale e Territoriale**  
**Corso di Laurea di laurea specialistica in Ingegneria per**  
**l'Ambiente e il Territorio**



**QUALITÀ DEGLI SCARICHI URBANI:**  
**UTILIZZO DI SERIE DI PRECIPITAZIONE NELLA**  
**VALUTAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DI VASCHE DI**  
**PRIMA PIOGGIA**

Relatore: Prof. Ing. Stefano Mambretti

Tesi di Laurea di:

Riccardo Cappellini Matr. 749941

Anno Accademico 2010-2011



---

# INDICE

Capitolo 1: INTRODUZIONE .....	1
Capitolo 2: INQUADRAMENTO GENERALE E STUDI PREGRESSI.....	3
2.1 Introduzione .....	3
2.2 I Sistemi Fognari .....	3
2.3 La qualità delle acque di pioggia.....	5
2.4 Il fenomeno del first flush.....	7
2.5 Normativa.....	9
2.6 Vasche di prima pioggia .....	11
2.6.1 Tipologie di vasche.....	12
2.6.2 Posizionamento nella rete .....	15
2.6.3 Modalità di svuotamento.....	16
2.6.4 Rimozione degli inquinanti.....	18
2.6.5 Efficienze delle vasche di prima pioggia .....	23
2.6.6 Modellazione delle vasche di prima pioggia.....	24
2.7 Realizzazione di idrogrammi e pollutogrammi.....	28
2.7.1 Idrogrammi di piena.....	28
2.7.2 Pollutogrammi .....	34
2.8 Studi precedenti.....	38
2.9 Conclusioni .....	41

---

Capitolo 3: GENERAZIONE DI SERIE SINTETICHE DI PIOGGIA .....	43
3.1 Introduzione .....	43
3.2 Modelli di precipitazione a processi puntuali .....	44
3.3 Modello Neyman Scott Rectangular Pulses .....	48
3.4 Stima dei parametri del modello .....	51
3.4.1 Momenti del modello NSRP .....	52
3.4.2 Momenti campionari .....	54
3.5 Generazione di una serie storica sintetica .....	55
3.5.1 Applicazione del modello NSRP .....	56
3.6 Conclusioni .....	59
Capitolo 4: CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO .....	60
4.1 Dati .....	60
4.1.1 Strumento di misura .....	60
4.1.2 Digitalizzazione dei dati .....	61
4.1.3 Ricostruzione della serie storica .....	62
4.2 Calibrazione del modello .....	64
4.2.1 Calibrazione con foglio di calcolo .....	64
4.2.2 Calibrazione con Calcolo Evolutivo .....	65
4.3 Generazione di una serie storica sintetica .....	72
4.4 Validazione del modello .....	74
4.4.1 Verifica delle statistiche annuali .....	75
4.4.2 Verifica delle statistiche riprodotte .....	76
4.4.3 Verifica delle Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica .....	77
4.5 Conclusioni .....	78



---

Capitolo 5: DISAGGREGAZIONE STOCASTICA DI SERIE DI PIOGGIA .....	80
5.1 Introduzione .....	80
5.2 Canonical Random Cascade Model.....	83
5.2.1 Cascade Generator .....	83
5.2.2 Moment Scaling.....	85
5.3 Calibrazione del modello .....	86
5.4 Validazione del modello .....	88
5.4.1 Conservazione della massa totale .....	89
5.4.2 Riproduzione della distribuzione.....	91
5.5 Conclusioni .....	92
Capitolo 6: ANALISI AD EVENTO DEL FUNZIONAMENTO DI VASCHE DI PRIMA PIOGGIA.....	94
6.1 Introduzione .....	94
6.2 Modelli e scelte di calcolo utilizzate .....	95
6.2.1 Precipitazione.....	95
6.2.2 Idrogramma di piena .....	95
6.2.3 Processo di accumulo .....	96
6.2.4 Processo di dilavamento.....	96
6.3 Descrizione eventi di precipitazione.....	96
6.4 Confronto con analisi su eventi reali .....	98
6.5 Simulazioni del funzionamento delle vasche di cattura.....	101
6.5.1 Valutazione delle concentrazioni scaricate.....	101
6.5.2 Valutazione delle concentrazioni scaricate.....	104
6.5.3 Calcolo delle efficienze .....	106

---

6.6	Analisi critica dei risultati delle simulazioni.....	108
6.6.1	Verifica della dipendenza dei rendimenti dall'intensità totale .....	108
6.6.2	Verifica della dipendenza dei rendimenti dal volume totale .....	108
6.6.3	Verifica della dipendenza dei rendimenti dalla durata dell'evento.....	109
6.6	Conclusioni .....	110
Capitolo 7: ANALISI CONTINUA DEL FUNZIONAMENTO DI VASCHE DI PRIMA PIOGGIA.....		
		111
7.1	Introduzione .....	111
7.2	Limiti dell'analisi ad evento.....	111
7.3	Modello continuo di accumulo.....	113
7.4	Confronto tra approccio continuo e analisi ad evento .....	114
7.4.1	Confronto tra pollutogrammi.....	115
7.4.1	Confronto tra efficienze globali .....	117
7.5	Conclusioni .....	118
Capitolo 8: CONCLUSIONI.....		
		119
8.1	Riepilogo degli obiettivi della tesi.....	119
8.2	Risultati ottenuti .....	119
8.3	Modelli e scelte di calcolo utilizzate .....	121
Appendice A: Routine di calcolo del software RainSim V3.1.1 .....		
		123
A.1	Analisi della serie di dati.....	123
A.2	Fitting delle statistiche campionarie .....	125
A.2	Simulazione di una serie storica .....	126

---

Appendice B: Idrogrammi e Pollutogrammi degli eventi analizzati .....	128
B.1 Anno medio: numero 12.....	128
B.2 Anno massimo: numero 81.....	139
B.3 Anno minimo: numero 10 .....	151
Appendice C: Simulazione delle masse scaricate relative agli eventi analizzati .....	166
C.1 Anno medio: numero 12.....	166
C.2 Anno massimo: numero 81.....	167
C.3 Anno minimo: numero 10 .....	168
Appendice D: Simulazione delle concentrazioni scaricate relative agli eventi analizzati.....	170
D.1 Anno medio: numero 12 .....	170
D.2 Anno massimo: numero 81 .....	171
D.3 Anno minimo: numero 10.....	172
Appendice E: Efficienze stimate per gli eventi analizzati.....	174
E.1 Anno medio: numero 12.....	174
E.2 Anno massimo: numero 81.....	175
E.3 Anno minimo: numero 10.....	176
Bibliografia.....	177

# INDICE DELLE FIGURE

## Capitolo 1

## Capitolo 2

Figura 2.1: esempi di sezioni per condotte fognarie .....	4
Figura 2.2: massa di inquinante in funzione del volume (Bertrand-Krajewski et al., 1998).....	8
Figura 2.3: schema di un impianto per il trattamento di acque di prima pioggia con vasca di cattura, di tipo <i>EURO MEC serie IPP/AM</i> .....	13
Figura 2.4: schema di un impianto di separazione di acque di prima pioggia con vasca a tre comparti.....	14
Figura 2.5: schemi di posizionamento, a sinistra rete unitaria, a destra rete separata; dall'alto verso il basso esempi di vasche on line (a,b), off line con scaricatore di piena (c,d), e off line con scaricatore e bypass (f,g).....	16
Figura 2.6: Idrogramma di un sistema fognario misto con vasca di prima pioggia in linea caratterizzata da svuotamento in continuo (Bornatici et al., 2004) .....	17
Figura 2.7: portate registrate con l'attuale metodo di svuotamento e simulate con il nuovo funzionamento proposto.....	17
Figura 2.8: massa scaricata al variare del volume utile della vasca in base al diverso schema impiantistico (Paoletti e Papiri, 2003) .....	19

Figura 2.9: massa scaricata al variare del volume utile della vasca in base alla diversa tipologia del sistema fognario (Paoletti e Papiri, 2003) .....	19
Figura 2.10: massa scaricata al variare del volume utile della vasca in base al diverso valore del rapporto di diluizione (Paoletti e Papiri, 2003) .....	20
Figura 2.11: svuotamento in continuo, percentuale di volume e massa intercettati al variare del volume della vasca e della portata di svuotamento (Ciaponi et al., 2005).....	21
Figura 12: svuotamento intermittente senza interruzione. Percentuale di volume e massa intercettati al variare del volume della vasca e della portata di svuotamento per: a) $t_{tot}=24$ ore, b) $t_{tot}=48$ ore, c) $t_{tot}=96$ ore (Ciaponi et al., 2005) .....	22
Figura 13: : svuotamento intermittente con interruzione. Percentuale di volume e massa intercettati al variare del volume della vasca e della portata di svuotamento per: a) $t_{tot}=24$ ore, b) $t_{tot}=48$ ore, c) $t_{tot}=96$ ore (Ciaponi et al., 2005) .....	22
Figura 2.14: andamento del rendimento di rimozione in funzione della durata, per due località e diversi schemi impiantistici, Olivieri et al, (2000), .....	23
Figura 2.15: schema del processo di sedimentazione in ua vasca .....	26
Figura 2.16: esempio di LSPP ricavate per tempi di ritorno di 5, 2 e inferiori a 1 anno (Albizzati Mantegazza, 2007).....	30
Figura 2.17: esempio di ietogramma Chicago.....	32
Figura 2.18: esempi di idrogrammi ottenuti in alto con ietogramma costante, mentre in basso con ietogramma Chicago.....	34
Figura 2.19: esempio di curve di accumulo .....	35
Figura 2.20: esempio di curve di dilavamento al variare del parametro wash.....	37
Figura 2.21: pollutogramma ottenuto con ietogramma costante, per tempi di ritorno minori di un anno e diverse durate.....	37
Figura 2.22: confronto delle efficienze di rimozione delle diverse tipologie di vache, in alto con ietogramma costante, in basso con ietogramma Chicago.....	38

Figura 2.23: volumi d'acqua inviati a depurazione in funzione della durata per i diversi tipi di vasca per uno ietogramma costante con tempo di ritorno pari a 5 anni e tempo di corrivazione 60 minuti. .... 39

Figura 2.24: pollutogramma e idrogramma inviati a depurazione per una vasca a tre comparti, in caso di ietogramma costante con tempo di ritorno pari a 5 anni e tempo di corrivazione 60 minuti. .... 39

Figura 2.25: idrogrammi e pollutogrammi ricavati con dati di pioggia reali, per evento invernale e estivo. .... 40

### Capitolo 3

Figura 3.1: esempio di pluviogramma generato con un modello PWN..... 45

Figura 3.2: esempio di pluviogramma generato con un modello PRP ..... 46

Figura 3.3: esempio di pluviogramma generato con un modello NSWN..... 46

Figura 3.4: esempio di pluviogramma generato con un modello NSRP..... 47

Figura 3.5: schema concettuale del modello Neyman-Scott Rectangular Pulse (A.Burton et al., 2008)..... 50

Figura 3.6: esempio grafico di celle convettive o stratiformi (Cowpertwait e O'Connel, 1997). .... 50

Figura 3.7: esempio di distribuzione delle celle di pioggia in un bacino ad un determinato istante temporale (Burton et al., 2004)..... 51

Figura 3.8: schema grafico dell'implementazione di una distribuzione di probabilità (Kottegoda e Rosso, 2008)..... 56

Figura 3.9: schema delle principali fasi dell'utilizzo del programma. in blu sono riportate le operazioni eseguite dal software, nei rettangoli input e output, in giallo i file che normalmente devono essere inseriti dall'operatore, mentre in bianco quelli creati, (Burton, 2008)..... 59

## Capitolo 4

Figura 4.1: a destra l'apparato di registrazione di un pluviografo analogico (SIAP UM8150), a sinistra esempio di un pluviometro a vaschette.....	61
Figura 4.2: esempio di file registrato dal pluviometro di Milano Monviso. ....	62
Figura 4.3: altezze di pioggia mensili mediate sui 20 anni di registrazioni. ....	62
Figura 4.4: altezze totali annuali dei 20 anni di registrazione. ....	63
Figura 4.5: andamento della funzione obiettivo al variare del parametro beta. ....	65
Figura 4.6: tipico andamento di un algoritmo evolutivo di ottimizzazione, (Eiben e Smith, 2003).....	66
Figura 4.7: interfaccia del programma con algoritmo genetico,.....	68
Figura 4.8: andamento della funzione obiettivo per ogni generazione, a destra il miglior individuo,.....	69
Figura 4.9 interfaccia dell'algoritmo con programmazione evolutiva (EP),.....	70
Figura 4.10: andamento del fitness in funzione del parametro $\tilde{\alpha}$ .....	71
Figura 4.11: funzione obiettivo ottenuta per i mesi dell'anno. ....	73
Figura 4.12: esempio di un anno generato .....	74
Figura 4.13: esempio di un anno misurato (1971).....	75
Figura 4.14: confronto delle altezze cumulate annuali tra serie generata e serie misurata.....	75
Figura 4.15: confronto tra statistiche misurate, stimate con modello NSRP e generate. ....	77
Figura 4.16: confronto tra LSPP e massimi estratti dalla serie generata. ....	78

## Capitolo 5

Figura 5.1: esempio dei modelli deterministici discreto (destra) e continuo (sinistra) proposti da L.E. Ormsbee, 1989.....	81
Figura 5.2: schematizzazione della proprietà di autosomiglianza temporale (a destra) e spaziale ( a sinistra). .....	81
Figura 5.3: esempio di disaggregazione con modelli moltiplicative random cascades (da Onof et al., 2005).....	82
Figura 5.4: distribuzioni di $Y$ e $Y'$ (con $\sigma^2=0.41$ )......	84
Figura 5.5: grafico con dal quale si sono estratti i valori di $\tau q$ .....	87
Figura 5.6: funzione MKP calcolata sulla base delle osservazioni .....	88
Figura 5.7: confronto tra serie di altezza di pioggia del 1971 a 15 minuti misurata (sopra) e disaggregata (sotto).....	89
Figura 5.8: confronto tra altezze cumulate annuali misurate e disaggregate. ....	90
Figura 5.9: confronto tra altezze cumulate annuali generate e disaggregate. ....	90
Figura 5.10: funzione di ripartizione della serie misurata e disaggregata.....	91

## Capitolo 6

Figura 6.1: confronto tra idrogrammi e pollutogrammi relativi a un evento convettivo reale (sopra), e un evento sintetico (sotto).....	99
Figura 6.2: : confronto tra idrogrammi e pollutogrammi relativi a un evento frontale reale (sopra), e un evento sintetico (sotto).....	100
Figura 6.3: pollutogramma in e out alla vasca nel caso di dimensionamento per 2.5 e 5 mm. Evento 11 dell'anno 12.....	101



Figura 6.4: pollutogramma in e out alla vasca per 5 mm di precipitazione. in alto evento 24 anno 81, in basso evento 19 anno 10..... 102

Figura 6.5: confronto tra massime concentrazioni in ingresso e uscita alle vasche, valutate per tutti gli eventi estratti..... 104

Figura 6.6 confronto tra masse dilavate e masse in uscita dalle vasche, valutate per tutti gli eventi estratti..... 105

Figura 6.7: rendimenti di rimozione delle masse relative a vasche da 50 mc per eventi dell'anno 12, per  $T_c = 60$  minuti ..... 106

Figura 6.8: dipendenza dei rendimenti dall'intensità massima degli eventi, a sinistra per le concentrazioni, a destra per le masse..... 108

Figura 6.9: dipendenza dei rendimenti dal volume totale degli eventi, a sinistra per le concentrazioni, a destra per le masse. .... 109

Figura 6.10: dipendenza dei rendimenti dalla durata totale degli eventi, a sinistra per le concentrazioni, a destra per le masse..... 109

## Capitolo 7

Figura 7.1: esempio di evento di lunga durata estratto dalle serie di dati sintetiche (evento 15, anno 12)..... 112

Figura 7.2: pollutogramma associato all'evento 15 dell'anno 12..... 112

Figura 7.3: curva di accumulo ottenuta con i parametri utilizzati in questo studio..... 113

Figura 7.4: andamento del processi di accumulo per l'anno 12, valutato in continuo.. 114

Figura 7.5: : pollutogramma associato all'evento 15 dell'anno 12, ottenuto con modellazione continua del processo di accumulo ..... 115

Figura 7.6: confronto di pollutogrammi stimati con i due modelli, relativi all'evento 12 dell'anno 81 ..... 116

Figura 7.7: confronto di pollutogrammi stimati con i due modelli, relativi all'evento  
12 dell'anno 81 ..... 117

## Capitolo 8

# INDICE DELLE TABELLE

## Capitolo 1

## Capitolo 2

Tabella 2.1: valori di X, Y e b che delimitano le zone nel grafico in figura 2.2.....	8
Tabella 2.2: fasi previste dalla direttiva comunitaria 2000/60/CE .....	9
Tabella 2.3: coefficienti riduttivi per le durate inferiori all'ora .....	29

## Capitolo 3

## Capitolo 4

Tabella 4.1: statistiche campionarie utilizzate per la calibrazione del modello.....	63
Tabella 4.2: limiti dei parametri del modello NSRP (Burton, 2008).....	64
Tabella 4.3: risultati ottenuti con programma evolutivo.....	71
Tabella 4.4: statistiche campionaria con dati aggregati a 1 h.....	72
Tabella 4.5: risultati della calibrazione del modello.....	73
Tabella 4.6: confronto tra statistiche sulle altezze cumulate annuali tra serie generata e serie misurata.....	75

Tabella 4.7: parametri delle LSPP stimati per il sito di studio (Mignosa et al., 1992)... 77

Tabella 4.8: intensità estratte dalla serie generata. .... 78

## Capitolo 5

Tabella 5.1: pendenze estratte dai momenti campionari..... 87

Tabella 5.2: errori commessi nel processo di disaggregazione, sia con dati misurati  
che con dati generati..... 91

## Capitolo 6

Tabella 6.1: riassunto del numero e delle caratteristiche degli eventi estratti dagli  
anni in esame..... 97

Tabella 6.2: caratteristiche degli eventi convettivi a confronto ..... 98

Tabella 6.3: caratteristiche degli eventi frontali a confronto..... 100

Tabella 6.4: masse dilavate e scaricate per gli eventi degli anni in esame. .... 105

Tabella 6.5: esempio di calcolo delle efficienze per l'anno 12, e tempo di  
corrivazione pari a 15 minuti ..... 107

## Capitolo 7

Tabella 7.1: efficienze globali annuali dei due diversi approcci, per vasche  
dimensionate per 5 mm di pioggia. .... 118

## Capitolo 8

## Capitolo 1:

# INTRODUZIONE

Nell'ottica di conservazione della qualità dei corpi idrici superficiali, assumono sempre più importanza le caratteristiche degli scarichi urbani. Se le acque "nere", vale a dire le portate provenienti da scarichi civili e industriali, possono essere trattate da impianti di depurazione prima di essere scaricate per via delle basse portate, al contrario le portate dette "bianche", provenienti dal drenaggio delle aree impermeabili in caso di eventi piovosi, non possono essere inviate a depurazione per via delle grandi portate molto diluite, non trattabili da questi impianti. La soluzione, in questi casi, è rappresentata da scaricatori di piena che convogliano direttamente al recettore queste acque scarsamente inquinate. Questa operazione non avrebbe nessuna ripercussione, se non fosse per il fenomeno di dilavamento degli inquinanti dalle superfici impermeabili, conseguenti all'accumulo durante il periodo secco. Nel caso il fenomeno di dilavamento si concentri nei primi istanti di precipitazione, si parla di first flush, a indicare una prima parte dell'idrogramma fortemente contaminata, contenente la maggior parte dell'inquinante accumulato (e dilavato) sul bacino. Sulla base di queste osservazioni, sono stati ideati dei dispositivi per intercettare questa parte di idrogramma, chiamati vasche di prima pioggia, che nel modello più comune, le vasche di cattura, allontanano temporaneamente la prima parte dell'idrogramma per poi inviarla a depurazione, a fine evento. In particolare, con i regolamenti regionali in attuazione del D.lgs. 3 aprile 2006 n°152, viene prescritto di dimensionare tali manufatti allo scopo di intercettare i primi 5 mm di precipitazione. Questo semplice criterio di progettazione non risulta però sufficiente a descrivere il complesso funzionamento delle vasche, perché non è sempre verificata l'ipotesi di base di first flush.

Per questo motivo si sono studiati, in passato, diversi metodi per verificare il funzionamento delle vasche, in modo da poter identificare l'evento critico. La

caratteristica fondamentale di queste analisi è la necessità di studiare le proprietà medie della precipitazione, nelle condizioni più frequenti, e non uno studio dei massimi, utile invece a risolvere problemi quantitativi di smaltimento. A questo scopo sono stati impiegati ietogrammi sintetici, come gli ietogrammi costante e Chicago, come forzante del processo di formazione del deflusso e del dilavamento. Oltre a questo sono stati utilizzati due modelli per descrivere l'accumulo e il dilavamento degli inquinanti sul bacino in esame. Anche questo approccio però non risulta ben riprodurre il comportamento delle vasche, simulato con dati reali di precipitazione in ingresso.

Partendo da questi risultati, si è impostato il lavoro di tesi. Dopo un corposo inquadramento del problema in esame (Capitolo 2), nel quale vengono messe in evidenza le criticità da approfondire, vale a dire lo ietogramma in ingresso e i parametri del modello di dilavamento, si è deciso di concentrarsi sul primo aspetto: la ricerca di uno ietogramma di pioggia adatto alla simulazione. Lo studio si è concentrato in due momenti principali: la generazione di serie di pioggia sintetiche, adottando un modello di precipitazione a processi puntuali (Capitolo 3), del quale si è operata una calibrazione con diverse metodologie (Capitolo 4), a partire dalla serie di pioggia misurata nella stazione di Milano Monviso, sino alla generazione di una serie sintetica alla risoluzione temporale di un ora. Per le applicazioni a vasche di prima pioggia la risoluzione temporale richiesta è sub oraria, per questo si è implementato un disaggregatore sfruttando la serie misurata, a risoluzione di 5 minuti, per raggiungere la risoluzione temporale di 15 minuti, adeguata allo studio.

Una volta ottenuta la serie sintetica di pioggia, si è passati alla seconda fase del lavoro: l'analisi del funzionamento delle vasche di prima pioggia. In questa parte si è affrontato sia un approccio a evento (Capitolo 6) sia un approccio in continuo (Capitolo 7), con un confronto sui risultati ottenuti.

## Capitolo 2:

# INQUADRAMENTO GENERALE E STUDI PREGRESSI

## 2.1 Introduzione

Con lo sviluppo urbano che ha caratterizzato l'ultimo secolo è cresciuto il problema delle infrastrutture civili quali, ad esempio, le reti idrauliche di approvvigionamento idrico o di smaltimento dei reflui urbani. Oggetto di questo lavoro è lo studio di quest'ultimo tipo di servizio. Data la complessità dell'argomento verrà proposta solo una breve introduzione ai sistemi fognari, con un approfondimento sulla tematica delle vasche di prima pioggia, base dello studio che seguirà. Saranno introdotte le problematiche relative alla qualità dei recapiti di reflui urbani nei recettori, e un accenno alla normativa. Infine verrà introdotto il tema delle vasche di prima pioggia, con descrizioni dei principali manufatti e analisi del loro funzionamento, riportando i risultati ottenuti in studi pregressi.

## 2.2 I Sistemi Fognari

Per sistema di drenaggio urbano s'intende un complesso di opere e manufatti atti a raccogliere e convogliare dalle zone urbanizzate i reflui domestici, industriali e le acque meteoriche, per poi recapitarli a corpi idrici recettori previo trattamento di depurazione. Il flusso nelle canalizzazioni di raccolta è sempre a pelo libero, si parla infatti di crisi della rete quando la sezione delle tubazioni non è sufficiente a smaltire la portata di reflui, e il flusso entra quindi in pressione.

Il problema della sezione di progetto di un sistema fognario è tutt'altro che banale, data la variabilità delle portate che deve smaltire. Le portate affluenti in rete sono

generalmente divise in due categorie: acque nere, derivanti dai reflui civili e industriali la cui entità si può stimare mediamente in circa 100-200 l/abitante giorno, e acque bianche o meteoriche, dovute alle precipitazioni piovose, superiori anche di due ordini di grandezza alle precedenti. La variabilità delle portate implica che, in caso di eventi meteorici, le acque non possano essere inviate a depurazione per l'impossibilità da parte degli impianti di trattare volumi così grandi e così diluiti, in questi casi la maggior parte dell'acqua viene sfiorata e inviata direttamente a un ricettore. Vi è poi un'ulteriore distinzione nelle acque bianche, vengono definite acque bionde, o acque di prima pioggia, le portate derivanti dai primi momenti di precipitazione che risultano inquinate a causa del dilavamento delle superfici impermeabili. Un altro vincolo per la scelta della sezione è presentato dalle velocità del fluido che devono mantenute tra 0.5 e 2 m/s, per evitare da un lato la sedimentazione dei solidi sospesi e dall'altro limitare i problemi di erosione delle tubature.

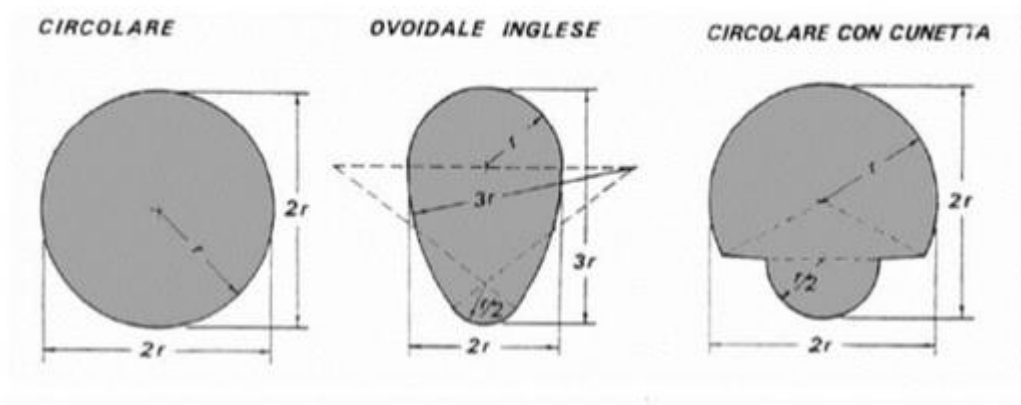


Figura 2.1: esempi di sezioni per condotte fognarie

La figura 2.1 mostra alcuni esempi di sezioni utilizzate nelle condotte. La più semplice, cioè quella circolare, può essere utilizzata nei sistemi fognari separati, i quali presentano due diverse reti di raccolta per acque bianche e nere, dimensionando due diversi diametri in base alle diverse portate. Le altre sezioni mostrate sono degli esempi di soluzioni elaborate per i sistemi fognari unitari, cioè le reti di drenaggio urbano che convogliano assieme le acque nere e le acque bianche. Come si nota in entrambi gli esempi, la sezione è variabile, in modo da poter adattare alle diverse portate in ingresso, mantenendo le caratteristiche di velocità pressochè costanti, è infatti necessario che le velocità restino entro un range per evitare al limite inferiore la sedimentazione, e al limite superiore l'eccessiva erosione delle condotte.



Le due diverse conformazioni delle reti urbane presentano vantaggi e svantaggi. Da un lato i sistemi di tipo unitario sono forniti di scaricatori di piena che, in caso di eventi di pioggia, deviano, oltre una certa soglia di portata, le acque, inviandole direttamente al ricettore; hanno lo svantaggio di mostrare basse velocità in tempo di magra e il vantaggio di ripulirsi automaticamente grazie alle acque meteoriche. I sistemi separati invece mostrano problemi di sedimentazione nelle acque nere, però hanno il vantaggio di non mettere a contatto acque nere e bianche mantenendo queste ultime pulite. La rete per le acque bianche inoltre può essere realizzata anche con materiali meno pregiati, in quanto non necessita delle caratteristiche di resistenza imposte per poter convogliare le acque nere. Va infine considerato che, anche in caso di reti separate, non è attendibile ipotizzare la qualità della acque bianche tale da poterle recapitare direttamente a un corpo idrico ricettore, è stato infatti dimostrato che le acque di prima pioggia, nominate in precedenza, presentano carichi inquinanti non trascurabili e dovrebbero quindi essere inviate a depurazione.

### **2.3 La qualità delle acque di pioggia**

La presenza di inquinanti nelle acque meteoriche, che vengono raccolte dai sistemi di drenaggio, è riconducibile a due principali componenti: in minima parte è causata dal passaggio delle gocce nell'atmosfera, ma principalmente è da attribuirsi al dilavamento delle superfici.

Le sostanze inquinanti nei bacini impermeabilizzati, provengono dall'erosione delle superfici, facilitate dagli agenti atmosferici, o da traffico veicolare, a causa dell'usura di pneumatici o degli apparati frenanti. Un ulteriore contributo è costituito da rifiuti abbandonati sul manto stradale oppure dai prodotti utilizzati per la manutenzione, come ad esempio il sale antigelo. È stato inoltre dimostrato che la quantità di deposito fine sulle superfici impermeabili, cresce di pari passo con l'intervallo secco tra due eventi di pioggia, va quindi valutato anche questo aspetto nella stima delle concentrazioni di inquinanti nel sistema di drenaggio.

Le modalità di dilavamento delle superfici dipendono da due fenomeni: l'impatto delle gocce al suolo e lo scorrimento superficiale delle acque. La prevalenza di un fenomeno rispetto all'altro dipende dal tipo di evento, si pensi a un evento convettivo con intensità molto elevate, e dalle superfici dilavate (Todeschini, 2007).

Una volta che l'acqua meteorica è stata drenata e si trova nella rete fognaria, può intervenire, soprattutto nei sistemi di tipo misto, un fenomeno di risospensione del materiale sedimentato dovuta alle alte velocità che si verificano in condotta. In tal modo si vanno ad aumentare ulteriormente i carichi inquinanti delle acque bianche.

Il trasporto degli inquinanti in condotta può avvenire in tre modi:

- In soluzione, per materiale molto fine (diametro inferiore a 10  $\mu\text{m}$ ); per questo tipo di materiale non si ha interazione con il fondo, e la concentrazione è pressoché costante lungo la verticale.
- In sospensione, per materiali più grossolani (diametro superiore a 10  $\mu\text{m}$ ); in questo caso, la concentrazione risulta molto maggiore in prossimità del fondo.
- A "balzi": questa particolare modalità interessa i granuli più grossi che si staccano dal fondo per pochi istanti compiendo dei veri e propri salti (Einstein 1942).

Si può quindi affermare che il carico inquinante delle acque meteoriche drenate consta nella somma di due contributi: il primo dal bacino dilavato e il secondo dalla pulizia delle condotte fognarie. Nei sistemi di tipo misto risulta complicato individuare quale componente fornisca il maggior carico, si è potuto verificare come in alcuni casi le portate di piena siano risultate maggiormente inquinate rispetto alle sole portate nere. Per i sistemi di tipo separato, invece, è stato possibile valutare quali inquinanti caratterizzino le acque nere e quali le acque meteoriche. Nel primo caso si sono osservate concentrazioni rilevanti di SST, BOD, COD e TKN, mentre nel secondo si sono rilevate alte concentrazioni di metalli pesanti. Anche se in media le concentrazioni non risentono della tipologia di fognatura, un confronto tra i due sistemi resta impossibilitato dal fatto che due reti di drenaggio hanno necessariamente bacini differenti.

Nella modellazione e nella valutazione delle concentrazioni di inquinante negli scarichi fognari, si prendono in considerazione i solidi sospesi totali (SST), in quanto risultano ben correlabili sia con il BOD<sub>5</sub> sia con il COD, parametri che analizzano il consumo di ossigeno per correlarlo alla materia organica presente nel campione. I due parametri risultano strettamente correlati tra loro, e possono essere messi in relazione agli SST tramite la seguente relazione:

$$BOD_5 = aSST \quad (2.1)$$

Dove  $a$  è un fattore che risulta correlato alla temperatura e alla velocità di degradazione della sostanza organica, può assumere valori come ad esempio 0.4, 0.512 o 0.639 mantenendo comunque dei buoni livelli di correlazione (Ciaponi et al., 2002b, 2007). L'azoto invece essendo legato alle sole acque nere, dipende fundamentalmente dalla diluizione del liquame. Per quanto riguarda i metalli pesanti, si nota che la loro concentrazione aumenta al crescere degli SST (Ciaponi et al., 2002b, 2007).

## 2.4 Il fenomeno del first flush

Con first flush si fa riferimento al carico inquinante della portata meteorica, drenata nella prima parte dell'evento. Come già citato in precedenza, le concentrazioni risultano elevate a causa di fenomeni di dilavamento del deposito presente sulle superfici e di risospensione del sedimento nei collettori fognari. Più raramente si è osservato il fenomeno inverso, detto last flush, cioè l'onda di portata inquinata nella parte terminale dell'evento. Questo è spiegabile a partire da particolari condizioni di disomogeneità delle celle di pioggia sul bacino, che producono uno sfasamento nel tempo del contributo dei vari sottobacini alla sezione di chiusura. Il fenomeno è molto complesso e influenzato da molti fattori quali il tempo secco tra due eventi, la pendenza del bacino e la sua estensione. Alcuni autori hanno dimostrato come non vi sia una relazione generale tra questo fenomeno e le caratteristiche del bacino (Saget et al, 1996; Bertrand-Krajewski et al., 1998). In generale si è notato un aumento dell'accadimento di questo fenomeno con l'aumento dell'intervallo secco tra due eventi.

Pur essendo un fenomeno non ancora del tutto chiarito, risulta di fondamentale importanza, per il controllo della qualità dei reflui, una sua stima quantitativa. Basti pensare a un bacino in cui il fenomeno ricorre molto spesso: per evitare di recapitare al ricettore grandi masse inquinanti, basterà dimensionare dei dispositivi atti a intercettare la prima parte dell'evento, in modo da allontanare la maggior parte della massa inquinante dagli scarichi. Nel caso opposto in cui si verifichi il fenomeno del last flush, le vasche di prima pioggia risultano completamente inefficienti.

Una possibile rappresentazione del fenomeno è stata introdotta da Calomino et al (1998) e si basa sul confronto del volume di acqua defluito con la massa di inquinante scaricato. Andando a riportare su un grafico, (figura 2.2) in ascissa il rapporto tra volume cumulato e volume totale scaricato e in ordinata il rapporto tra la massa

cumulata e la massa totale scaricata, è possibile individuare o meno la presenza del first flush (Bertrand-Krajewski et al., 1998). Il grafico è suddivisibile in 5 zone delimitate da 5 curve approssimabili con la seguente funzione:

$$Y = X^b \quad (2.2)$$

I valori di  $b$ ,  $Y$  e  $X$  che delimitano le zone sono riportati nella tabella 2.1

Tabella 2.1: valori di  $X$ ,  $Y$  e  $b$  che delimitano le zone nel grafico in figura 2.2

(X,Y)	b
(0.30; 0.80)	0.185
(0.78; 0.80) oppure (0.25; 0.30)	0.862
(0.80; 0.80) oppure (0.30; 0.30)	1.000
(0.82; 0.80) oppure (0.30; 0.25)	1.159
(0.80; 0.30)	5.395

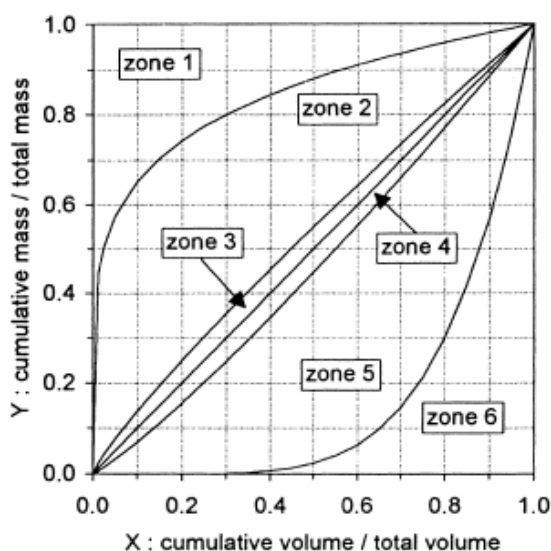


Figura 2.2: massa di inquinante in funzione del volume (Bertrand-Krajewski et al., 1998)

La figura 2.2 mostra che se la curva massa/volume o  $M(V)$  è compresa nelle zone 3 e 4, la concentrazione della massa scaricata risulti costante lungo tutto l'evento. Se invece la curva  $M(V)$  si trova al di sopra della bisettrice, significa che nel corso dell'evento la concentrazione scaricata diminuisce, proprio come nel fenomeno del first flush, addirittura se si ricade nella zona 1, si ha un fenomeno molto accentuato, con circa il 75% della massa scaricata dopo il deflusso del 20% del volume totale. In modo speculare, se si ricade nella zona 5 o 6, si ha invece il fenomeno del last flush, con la maggior parte della massa scaricata alla fine dell'evento.

## 2.5 Normativa

L'unione europea ha emesso, all'inizio del decennio, la nuova direttiva per la tutela delle acque 2000/60/CE, che cambia la regolamentazione per la qualità delle acque. Tale direttiva articola in diverse fasi (tabella 2.2) le modalità per il raggiungimento del "buono stato di qualità delle acque superficiali" entro il 2015.

**Tabella 2.2: fasi previste dalla direttiva comunitaria 2000/60/CE**

2003	Istituzione dei distretti idrografici e individuazione dell'autorità competente
2004	Analisi dei distretti idrografici
2006	Realizzazione del programma di monitoraggio
2006-2008	Realizzazione delle consultazioni pubbliche
2009	Adozione del piano di gestione del bacino idrografico
2012	Applicazione del programma delle azioni identificate nel piano di gestione
2013	Revisione e aggiornamento delle analisi e dei dati raccolti sui distretti nel 2006
prima del 2015	Esame dei risultati del monitoraggio
2015	dichiarazione sul buono stato di salute delle acque
2015	Revisione e aggiornamento dei piani di gestione dei bacini

A parte le piccole distinzioni tecniche nel recepimento della direttiva Europea, l'innovazione di tale regolamento sta nel passare oltre la logica del limite all'emissione (emission standard), adottando un approccio integrato più ampio che va a considerare congiuntamente sia la rete di smaltimento dei reflui sia il ricettore in cui si sversano le acque. Per attuare questa filosofia vengono fissati dei limiti di concentrazione nei corpi ricettori (stream standard), non più semplicemente allo scarico fognario, in questo modo si tiene conto anche della capacità di smaltimento del corpo idrico ricettore. Se da un lato la valutazione in questo modo risulta molto più adeguata e completa, bisogna anche tenere presente che la modellazione qualitativa e quantitativa di un sistema combinato rete di drenaggio-ricettore risulta più complicato.

La direttiva è stata recepita dall'Italia con il D.lgs. 3 Aprile 2006 n° 152 modificato e integrato ai sensi della Legge 27 Dicembre 2006 n° 296 e dal D.L. 28 Dicembre 2006 n° 300 Parte Terza, Sezione II – "Tutela delle acque dall'inquinamento", che fissa i limiti di concentrazione e delega alle regioni, previa approvazione del Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio, la disciplina e il controllo degli scarichi delle acque meteoriche. Le regioni possono anche richiedere determinate prescrizioni per le acque di dilavamento delle superfici impermeabili, e disciplinano anche i casi nei quali le acque di prima pioggia, provenienti da collettori fognari o da dilavamento di superfici, che presentino al loro interno sostanze pericolose o che pregiudichino il

raggiungimento degli obiettivi di qualità, siano convogliate e opportunamente trattate in impianti di depurazione. In ogni caso è comunque vietato lo scarico o l'immissione diretta di acque meteoriche nelle acque sotterranee.

I regolamenti delle varie regioni differiscono tra loro solo sui valori dei parametri in base ai quali dimensionare le vasche di prima pioggia. La regione Lombardia con il regolamento del 24 marzo 2006 n°4, relativo alla "Disciplina dello smaltimento delle acque di prima pioggia e di lavaggio delle aree esterne" definisce come acque di prima pioggia, i primi 5 mm di pioggia uniformemente distribuita su tutta la superficie del bacino, di un evento che sia intervallato dal precedente di almeno 96 ore. Tali acque non possono essere direttamente immesse in un corpo idrico ricettore, ma vanno raccolte e, successivamente all'evento, convogliate all'impianto di depurazione: *"le acque di prima pioggia e le acque di lavaggio che siano recapitate in corpo d'acqua superficiale ovvero sul suolo o negli strati superficiali del sottosuolo devono essere avviate ad apposite vasche di raccolta a perfetta tenuta, dimensionate in modo da trattenere complessivamente non meno di 50 mc per ettaro di superficie scolante. Alle acque di prima pioggia deve essere destinata un'apposita rete di raccolta e convogliamento munita di un sistema di alimentazione delle vasche di prima pioggia che le escluda automaticamente a riempimento avvenuto. La rete deve essere dimensionata sulla base degli eventi di breve durata e di elevata intensità caratteristici di ogni zona e comunque quanto meno assumendo che l'evento si verifichi in quindici minuti e che il coefficiente di afflusso alla rete sia pari ad 1 per la superficie scolante impermeabile e a 0,3 per quelle permeabili di qualsiasi tipo ad esse contigue escludendo dal computo le superfici incolte e quelle di uso agricolo"*. La legge prevede l'inserimento di vasche di prima pioggia in tutti gli scarichi entro il 2016.

I regolamenti delle altre regioni differiscono da quello appena esposto solo nei valori del tempo secco tra due eventi, ad esempio la regione Veneto lo stima in 48 ore, mentre il Trentino Alto Adige in 48-72 ore, e dell'altezza di pioggia da considerare prima pioggia: l'Emilia Romagna considera prima pioggia i primi 2.5-5 mm di pioggia. In altri casi vengono distinte acque meteoriche per il grado di inquinamento che presentano.

A prescindere dalle piccole differenze tra le regioni, l'elemento che accomuna i regolamenti sopradescritti è il considerare, come unico parametro per il dimensionamento della vasche di prima pioggia, la superficie impermeabile del bacino. Non vi sono infatti riferimenti al tipo di rete, separata o mista, o alla collocazione che la vasca deve avere nella rete, o all'uso del suolo del bacino drenato. Non sono nemmeno

prese in considerazione le modalità di gestione della vasca, che possono influire sensibilmente sulle efficienze di rimozione. Va inoltre considerato come, in reti di tipo unitario, parte delle acque di prima pioggia viene comunque inviata al depuratore, a causa del mancato raggiungimento della soglia di portata dello sfioro.

Altri aspetti che influiscono sul funzionamento delle vasche di prima pioggia sono sicuramente l'architettura della rete e il funzionamento degli scaricatori di pioggia, oltre che il clima. Si pensi al fenomeno del first flush sopradescritto, tra le altre cose è influenzato dall'IET (Inter Event Time), in bacini in cui piove di frequente il fenomeno non sarà rilevante mentre in altri in cui le piogge sono più rare e intense si avrà un maggiore accumulo di inquinanti sulla superficie del bacino.

A supporto delle considerazioni fatte si possono citare degli studi operati su bacini reali nei quali sono state ipotizzate vasche di prima pioggia, dimensionate secondo la normativa, che si sono rivelate insufficienti in alcuni casi e sovradimensionate in altri (Albizzati Mantegazza et al. 2007).

## 2.6 Vasche di prima pioggia

Come abbiamo visto nei paragrafi precedenti, per raggiungere il buono stato di salute delle acque superficiali ipotizzato dalla direttiva comunitaria 2000/60/CE, è necessario assicurare un certo livello di qualità negli scarichi inviati al ricettore. Si è anche mostrato come nel caso di eventi meteorici, la maggior parte dell'acqua drenata da un bacino impermeabile debba essere recapitata direttamente al ricettore, senza passare dall'impianto di depurazione, dati gli ingenti volumi e la qualità sostanzialmente buona della maggior parte del volume drenato. In presenza del fenomeno del first flush, si è evidenziato come il volume di acque dette di prima pioggia presenti da un lato un carico inquinante troppo elevato per poterle recapitare direttamente al ricettore, dall'altro una portata troppo elevata per poterle inviare a depurazione. Sono stati quindi studiati dei manufatti per poter intercettare e invasare le acque di prima pioggia sino a fine evento, per poi inviarle in periodo secco all'impianto di depurazione. Questi manufatti sono chiamati vasche di prima pioggia, e, se inseriti in modo opportuno all'interno della rete fognaria, possono permettere di rimuovere la maggior parte delle acque di dilavamento delle superfici impermeabili. Di seguito verranno descritti nel dettaglio i tipi e il funzionamento delle vasche di prima pioggia.

### 2.6.1 Tipologie di vasche

Generalmente la forma delle vasche è prismatica a base rettangolare o cilindrica, anche se, in alcuni casi, data la scarsa disponibilità di spazi per l'installazione, si utilizzano forme trapezoidali, sono comunque sconsigliabili forme troppo irregolari per evitare problemi di accumulo di sostanze in alcune zone. Le vasche sono solitamente interrato e coperte, anche se nel caso di reti pluviali possono essere scoperte. Per le vasche a base rettangolare non esistono prescrizioni tecniche per il rapporto tra le dimensioni, si è osservato che generalmente l'altezza non supera i 4-6 metri, mentre per le dimensioni della base si fanno valutazioni sulla massima economia. Le vasche a base circolare consentono di minimizzare le superfici laterali a parità di volume e area di base, anche se questo vantaggio è in parte annullato dal maggior costo nella realizzazione di pareti curve.

Verranno ora riportate le principali tipologie di vasca e le modalità di dimensionamento di tali manufatti.

- Vasche di cattura: (off line) questa tipologia di vasca è l'unica che permette di inviare a depurazione le sole acque di prima pioggia. In caso di rete unitaria il riempimento comincia in concomitanza con lo sfioro dalla rete, mentre in reti separate viene raggiunta direttamente dall'acqua transitante in rete. Durante la fase di riempimento la portata a valle della vasca è nulla, mentre a riempimento avvenuto la vasca viene bypassata e quindi tutta la portata a monte viene inviata al ricettore, in questo modo si evita di mettere a contatto le acque di prima pioggia con quelle meno inquinate del resto dell'evento. Per il dimensionamento di questi manufatti le normative indicano come valore di progetto i primi 2,5-5 mm di pioggia, distribuiti uniformemente sulla superficie del bacino. Nota la superficie, è dunque immediatamente ricavabile il volume della vasca

$$V = hS \quad (2.3)$$

Dove  $h$  è l'altezza di prima pioggia prescritta da normativa, mentre  $S$  indica la superficie del bacino.



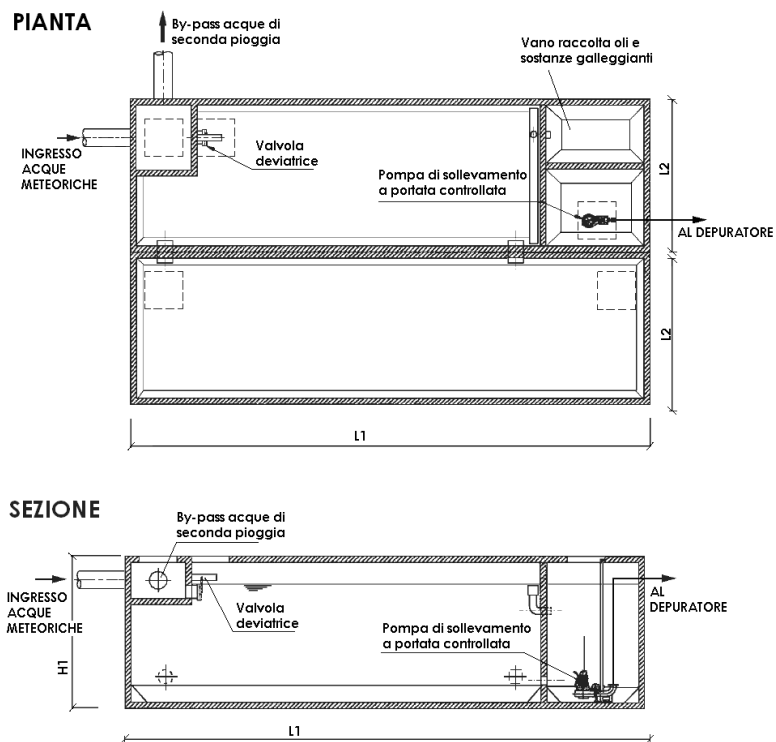


Figura 2.3: schema di una impianto per il trattamento di acque di prima pioggia con vasca di cattura, di tipo *EURO MEC serie IPP/AM*

Le opere accessorie necessarie per questo tipo di manufatto sono paratoie per realizzare il bypass, azionate da rilevatori di livello in vasca, e impianti di pompaggio per inviare a depurazione le acque di prima pioggia una volta terminato l'evento meteorico, la presenza di organi mobili implica la necessità di manutenzione periodica.

- Vasche di transito: (on line) in questa tipologia di vasca tutta la portata raccolta a monte del manufatto attraversa la vasca. Una volta riempita, le acque in ingresso continuano ad entrare, miscelandosi con quelle già presenti. Le portate che vengono inviate a depurazione non sono di conseguenza le sole acque di prima pioggia, ma parte di tutto il volume meteorico; questa caratteristica costituisce il principale limite di questa tipologia. In vasca si verifica un processo di sedimentazione, che permette di inviare a depurazione parte dell'inquinante in ingresso alla vasca, ma, l'ingresso di acqua in continuo, determina una miscelazione tale da inviare direttamente al ricettore parte degli inquinanti. Il maggiore vantaggio di questo manufatto è che non necessita organi in movimento, quindi anche la manutenzione risulta limitata.

- Vasche a tre compartimenti:** questo tipo di vasche viene utilizzato in sostituzione alle vasche di cattura, in quanto la separazione tra acque di prima e seconda pioggia viene eseguita automaticamente per mezzo di uno stramazzo, eliminando parti mobili e di conseguenza buona parte degli oneri di manutenzione. La separazione viene attuata mediante uno stramazzo, prima di raggiungere la soglia le acque vengono inviate a depurazione. Il problema di questa soluzione sta nel fatto che, anche quando viene superata la soglia, si continua a inviare acqua al depuratore, recapitando a trattamento ingenti volumi scarsamente inquinati, soprattutto nelle parti finali dell'idrogramma. Di seguito è riportato uno schema di un impianto con vasca a tre compartimenti. Questi manufatti presentano un ingombro molto ridotto, che comporta anche una scarsa capacità di invaso. La vasca presenta tre compartimenti: il primo, quello direttamente a contatto con l'acqua in ingresso, risulta spesso pieno d'acqua e si svuota solo a seguito di lunghi periodi secchi. Una volta iniziato l'evento, il primo comparto comincia a riempirsi, fino a raggiungere la soglia di uno stramazzo trapezoidale, che la mette in contatto con il secondo comparto (figura 2.4 sezione B-B).

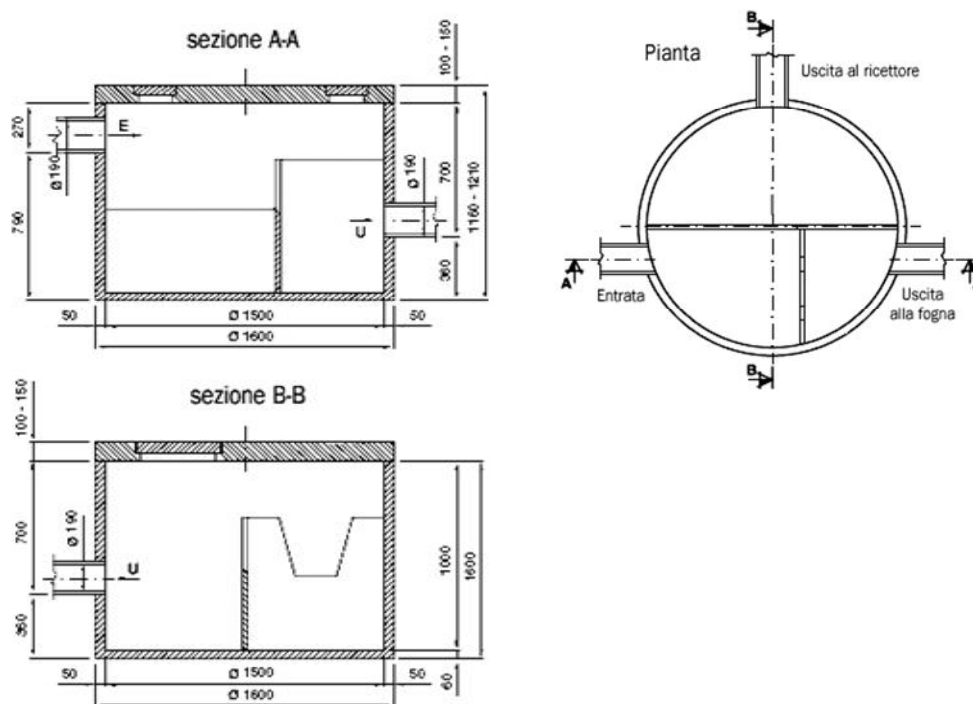


Figura 2.4: schema di un impianto di separazione di acque di prima pioggia con vasca a tre compartimenti

Questa seconda vasca ha una condotta di mandata che invia il flusso al depuratore. Se il flusso in ingresso nel primo comparto è superiore a quello che riesce a transitare nella condotta di uscita, il livello nel primo comparto si alza fino a raggiungere uno stramazzo a larga soglia che mette in contatto il primo e

il terzo comparto (figura 2.4 sezione A-A). Una volta raggiunto il terzo comparto, la portata viene inviata al ricettore. Il dimensionamento di queste vasche si utilizza come base lo stesso parametro utilizzato per le altre: l'altezza di precipitazione considerata prima pioggia, pari a 2,5 – 5 mm, ipotizzando che precipitino in 15 minuti. In questo modo si può agevolmente ricavare la portata che deve essere intercettata:

$$Q = \frac{hS}{d} \quad (2.4)$$

Dove  $Q$  è la portata,  $h$  è l'altezza di pioggia determinata da normativa,  $S$  la superficie impermeabile del bacino e  $d$  la durata ipotizzata. Tramite questo valore, fissata la larghezza della soglia trapezoidale, si può ricavare l'altezza di quest'ultima tramite l'equazione di efflusso:

$$Q = \mu A \sqrt{2g\Delta} \quad (2.5)$$

Dove  $\mu$  è il coefficiente di efflusso, in questo caso vale circa 0.4,  $A$  è l'area del trapezio,  $g$  è l'accelerazione gravitazionale e  $\Delta$  indica il dislivello tra i due stramazzi per la divisione delle portate.

### 2.6.2 Posizionamento nella rete

Le vasche di prima pioggia possono essere posizionate in due diversi modi all'interno della rete fognaria: in linea o fuori linea. Nel caso di vasca on line, l'invaso è costituito da una vasca di transito o semplicemente da un allargamento della sezione. Nella vasca transita tutta la portata proveniente da monte, mentre la sezione in uscita è dimensionata sulla base della portata massima smaltibile dal depuratore. In questo modo se la portata in ingresso supera la massima ammissibile in uscita, comincia l'invaso, una volta piena la vasca, la portata in eccesso viene inviata direttamente al recettore. Nel caso di vasca off line, tipicamente vasche di cattura o a tre comparti, invece la portata viene derivata dal collettore fognario e inviata alla vasca. Se la rete è di tipo unitario, la derivazione è operata mediante uno scaricatore di piena, mentre nel caso di rete separata invece può non essere presente, l'acqua raggiunge direttamente la vasca che una volta piena viene bypassata. Alcuni esempi degli schemi descritti sono riportati in figura 2.5.

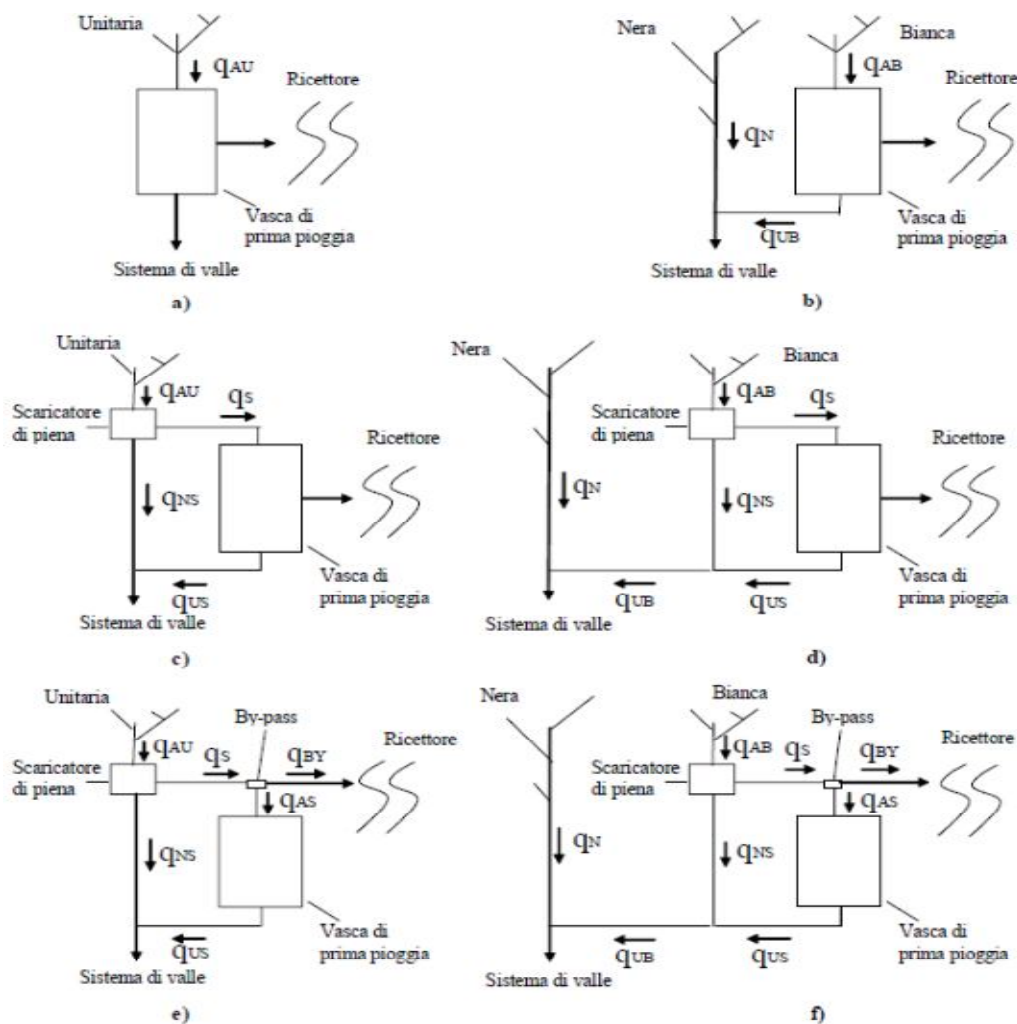
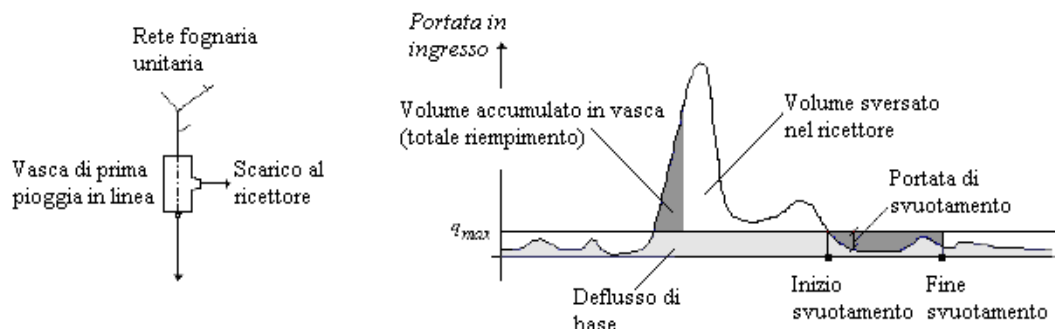


Figura 2.5: schemi di posizionamento, a sinistra rete unitaria, a destra rete separata; dall'alto verso il basso esempi di vasche on line (a,b), off line con scaricatore di piena (c,d), e off line con scaricatore e bypass (f,g).

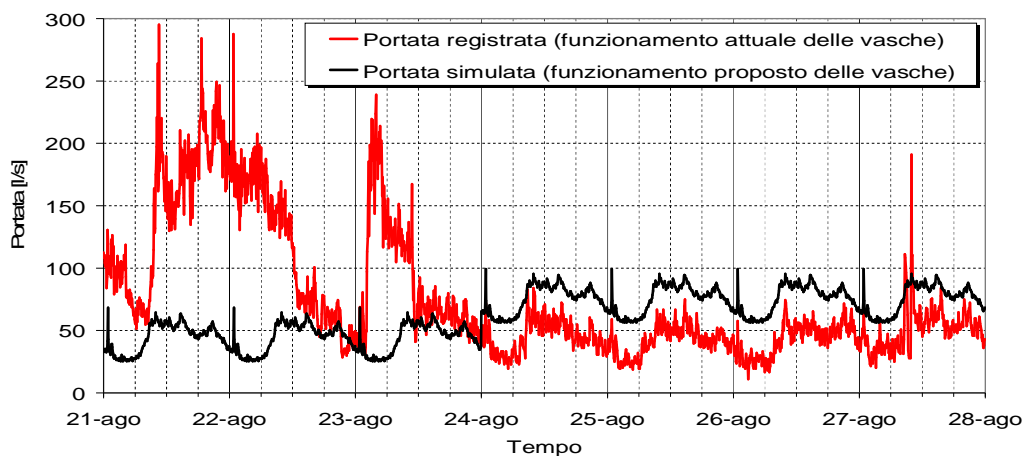
### 2.6.3 Modalità di svuotamento

Un'altra caratteristica importante nel funzionamento delle vasche di prima pioggia è la modalità di svuotamento. La modalità di svuotamento più semplice è quella in continuo, è la soluzione meno onerosa dal punto di vista impiantistico e gestionale, in quanto basta dimensionare la bocca di efflusso dalla vasca verso il depuratore per regolare la portata. Per contro però questa soluzione è quella che, a parità di dimensioni della vasca, invia all'impianto di trattamento i volumi maggiori di acqua, inoltre svuotandosi in continuo si rende sempre disponibile nuovo volume di invaso che viene sfruttato dalla portata meteorica in ingresso. Questo comporta nella parte finale dell'evento l'afflusso a depurazione di acque poco inquinate.



**Figura 2.6: Idrogramma di un sistema fognario misto con vasca di prima pioggia in linea caratterizzata da svuotamento in continuo (Bornatici et al., 2004)**

Il secondo metodo di svuotamento è quello a intermittenza, nel quale si identificano gli istanti di avvio e interruzione del processo, per ottimizzare sia tecnicamente che economicamente il processo. Questa seconda tipologia di gestione della vasca è sicuramente molto complessa e onerosa, in quanto necessita di una serie di opere accessorie che permettano di condurre lo svuotamento, ma permette di ottimizzare i volumi inviati a valle della vasca diminuendo i costi di trattamento delle acque, senza alterare le efficienze di rimozione delle vasche. Inoltre questa soluzione offre una flessibilità a nuove soluzioni atte a ottimizzare il processo. A supporto di quanto detto, vengono di seguito riportati i risultati di uno studio operato riguardo alle modalità di svuotamento delle vasche di prima pioggia installate nell'aeroporto di Malpensa (Franzetti e Mambretti 2008). In questo studio è stato proposto di svuotare le vasche con una portata costante per i quattro giorni successivi l'evento, invece che con portate intermittenti anche durante l'evento.



**Figura 2.7: portate registrate con l'attuale metodo di svuotamento e simulate con il nuovo funzionamento proposto**

Con la nuova logica, si nota come le portate inviate a depurazione risultino molto minori durante l'evento e leggermente superiori nel periodo successivo. La scelta di dilazionare in quattro giorni è nata dalla necessità di rendere disponibile l'invaso per un nuovo evento di pioggia. La normativa della regione Lombardia prescrive di intercettare le acque di prima per un evento che è stato preceduto da almeno 96 ore di tempo secco, in caso contrario si ritiene che nel bacino non si sia accumulata una quantità tale di inquinanti da pregiudicare l'immissione delle acque di dilavamento direttamente a un ricettore.

#### **2.6.4 Rimozione degli inquinanti**

Data la complessità dei fenomeni che intervengono nel dilavamento e nel trasporto degli inquinanti nella rete fognaria, sono stati svolti molti studi per analizzare la diversa influenza che hanno le componenti del problema sull'efficacia di rimozione delle sostanze inquinanti da parte delle vasche di prima pioggia. Di seguito verranno esposti alcuni risultati, ottenuti da diversi autori, riguardo a studi sul bacino di Cascina Scala (Pavia), nei quali verranno messe in luce le influenze degli schemi impiantistici e delle modalità di svuotamento sulla rimozione degli inquinanti.

Per mettere in evidenza il comportamento delle diverse tipologie di vasca, Paoletti e Papiri (2003) hanno svolto delle simulazioni per indagare come la tipologia di sistema fognario e la tipologia di vasca influisca sulle efficienze di rimozione, sfruttando come dati di pioggia in ingresso le rilevazioni dell'anno 2003. Sono quindi state eseguite tre simulazioni, tramite l'ausilio del software SWMM (Storm Water Management Model), per ogni simulazione, sono state ipotizzate tre soluzioni impiantistiche: con vasca di transito in linea, con vasca di transito fuori linea e con vasca di cattura fuori linea.

Nella prima simulazione si è preso in considerazione un collettore pluviale, nella seconda invece si è considerato un sistema misto, trascurando però fenomeni di sedimentazione e risospensione di materiale, mentre nel terzo si sono valutati anche questi aspetti. Per i casi delle vasche in linea lo svuotamento è stato posto in continuo, imponendo che la portata in uscita non superi la massima ammissibile all'impianto di depurazione, nel caso di vasca off line invece si è ipotizzato uno svuotamento intermittente, con avvio dello svuotamento al momento in cui la portata a monte torna a essere al di sotto di quella ammissibile, la portata in uscita dalla vasca è pari alla differenza tra la portata ammissibile e quella transitante a monte. Di seguito verranno riportati alcuni dei risultati più significativi tratti dallo studio.

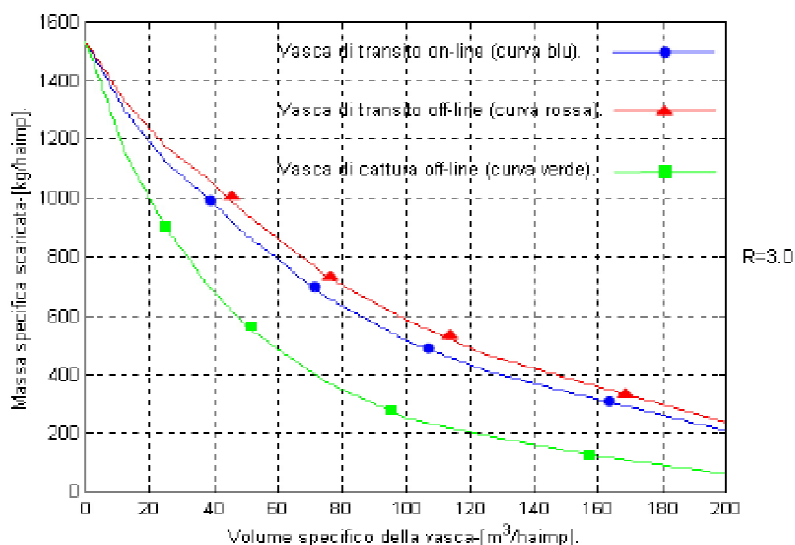


Figura 2.8: massa scaricata al variare del volume utile della vasca in base al diverso schema impiantistico (Paoletti e Papiri, 2003)

Dai risultati riportati in figura 2.8 si nota come le diverse tipologie di vasca influenzino anche di molto la quantità di inquinante scaricata al ricettore. Come è logico aspettarsi, all'aumentare del volume specifico della vasca diminuisce la portata scaricata, per tutte le tipologie considerate, a parità di volume specifico, la vasca di cattura fornisce delle prestazioni di molto superiori alle altre soluzioni. Questo risultato è spiegabile considerando il fenomeno del first flush, molto frequente in piccoli bacini simili a quello in esame: la vasca di cattura si limita a invasare la prima parte dell'idrogramma, inviando il resto della portata in eccesso al ricettore, nelle vasche di transito invece il continuo rimescolamento del volume nell'invaso comporta una miscelazione degli inquinanti e una conseguente maggiore massa scaricata al corpo idrico.

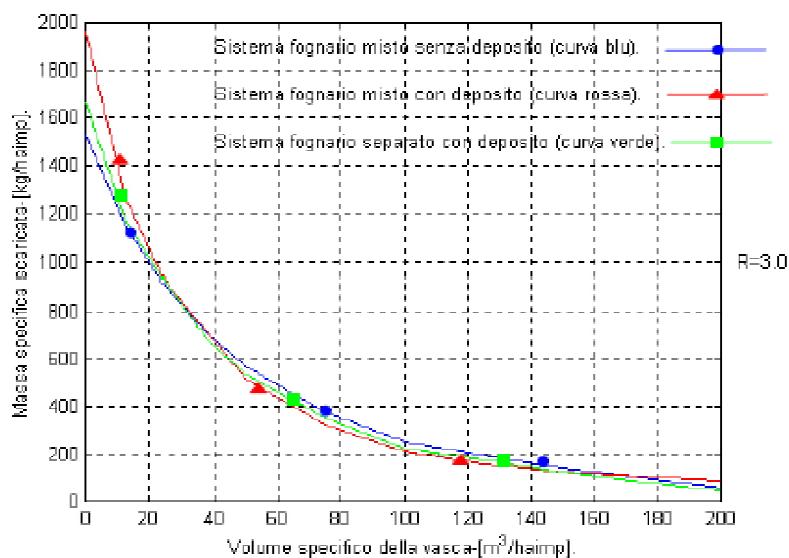
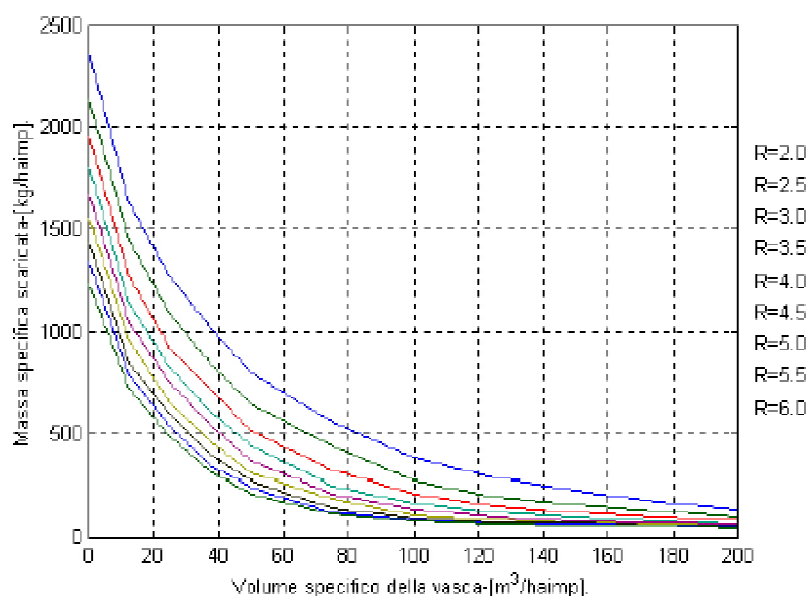


Figura 2.9: massa scaricata al variare del volume utile della vasca in base alla diversa tipologia del sistema fognario (Paoletti e Papiri, 2003)

La figura 2.9 mostra un ulteriore interessante risultato dello studio, si nota infatti come la tipologia di sistema fognario non influenzi sostanzialmente la massa scaricata al ricettore, in caso di presenza di uno scaricatore di piena e di una vasca di prima pioggia. Un'ulteriore informazione sul volume utile è ricavabile dal grafico: si può infatti notare come il beneficio in termini di riduzione della massa scaricata sia notevole per volumi da 0 a 50  $\text{m}^3/\text{h}_{\text{imp}}$ , mentre i benefici successivi risultino molto ridotti. Osservando la curva riferita al sistema misto con deposito (colore rosso) si può notare come nel primo intervallo citato vi sia una riduzione di circa 1500  $\text{kg}/\text{h}_{\text{imp}}$ , mentre raddoppiando il volume utile della vasca si ottenga una riduzione ulteriore di soli 300  $\text{kg}/\text{h}_{\text{imp}}$ . Questa tendenza è tanto più accentuata quanto più alto è il rapporto di diluizione<sup>1</sup> imposto allo scaricatore (figura 2.10).



**Figura 2.10: massa scaricata al variare del volume utile della vasca in base al diverso valore del rapporto di diluizione (Paoletti e Papiri, 2003)**

Altri studi operati da Ciaponi e Papiri (2005), sullo stesso bacino, hanno valutato l'influenza della modalità di svuotamento sulle massa scaricata al ricettore. Per questo studio è stata considerata una rete pluviale, con una vasca di transito con svuotamento in continuo e una vasca di cattura con bypass, svuotamento intermittente, senza scaricatore. In questo secondo caso si considerano due diversi schemi di svuotamento: nel primo caso lo svuotamento della vasca è completo, mentre nel secondo caso il

<sup>1</sup> Il rapporto di diluizione R indica il rapporto tra la portata complessiva, proveniente da un sistema misto o separato, adottata al trattamento durante l'evento di pioggia e la portata media nera in tempo asciutto, è un indice della portata di attivazione dello scaricatore di piena. Se ad esempio la portata nera è pari a 1 l/s e la portata di attivazione è pari a 2 l/s il rapporto di diluizione è pari a 2/1.



processo si interrompe se perviene nuovo afflusso da monte, in entrambi i casi una volta avviata la manovra la vasca resta disconnessa dalla rete.

Nelle simulazioni in continuo si nota come la massa intercettata aumenta sensibilmente tra i  $25 \text{ m}^3/\text{h}_{\text{imp}}$  e  $50 \text{ m}^3/\text{h}_{\text{imp}}$ , in seguito tende a stabilizzarsi, mentre si riscontra un sensibile aumento della rimozione con l'aumento della portata di svuotamento (figura 2.11). Questi dati trovano riscontro in quanto già affermato riguardo alle vasche di transito: miscelando la portata in ingresso con il volume presente in vasca, si viene a creare un volume più o meno omogeneo in quanto a concentrazione, allontanando una portata maggiore si riuscirà a intercettare un maggior quantitativo di massa inquinante.

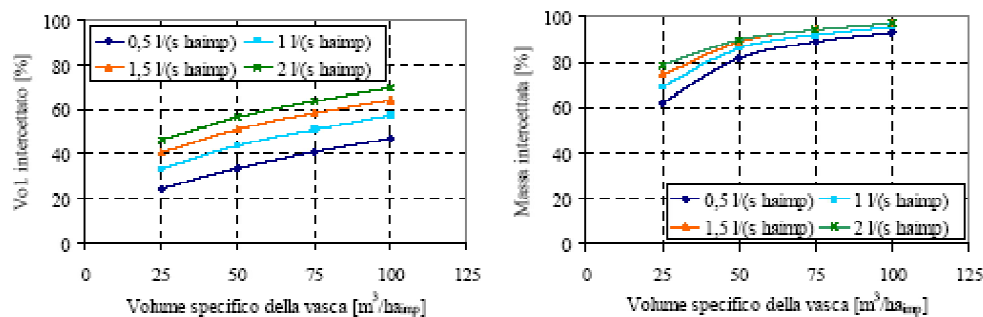


Figura 2.11: svuotamento in continuo. Percentuale di volume e massa intercettati al variare del volume della vasca e della portata di svuotamento (Ciaponi et al., 2005)

Questo comportamento è confermato anche nel caso di svuotamento intermittente, in aggiunta si può notare un peggioramento nelle prestazioni con l'aumentare dell'Inter Event Time. I risultati di queste elaborazioni sono riportati nelle figure 2.11 e 2.12.

L'analisi delle diverse modalità di svuotamento ha evidenziato come, a parità di massa intercettata, la modalità in continuo invii all'impianto di depurazione un maggior volume di acqua, con costi di esercizio maggiori, si ha però un minore costo di investimento date le minori dimensioni di questo sistema. I sistemi con svuotamento intermittente non sono invece condizionati dalla portata di svuotamento, ma si rivelano sempre più inefficaci al crescere dell'Inter Event Time.

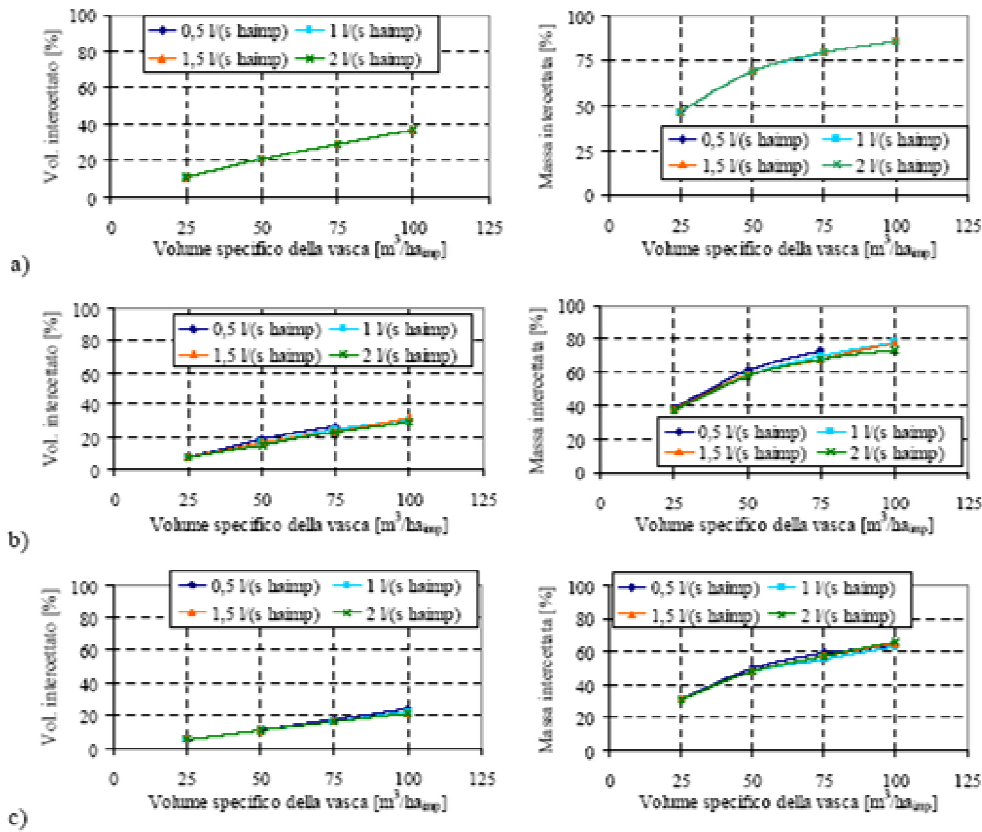


Figura 12: svuotamento intermittente senza interruzione. Percentuale di volume e massa intercettati al variare del volume della vasca e della portata di svuotamento per: a)  $t_{tot}=24$  ore, b)  $t_{tot}=48$  ore, c)  $t_{tot}=96$  ore (Ciapponi et al., 2005)

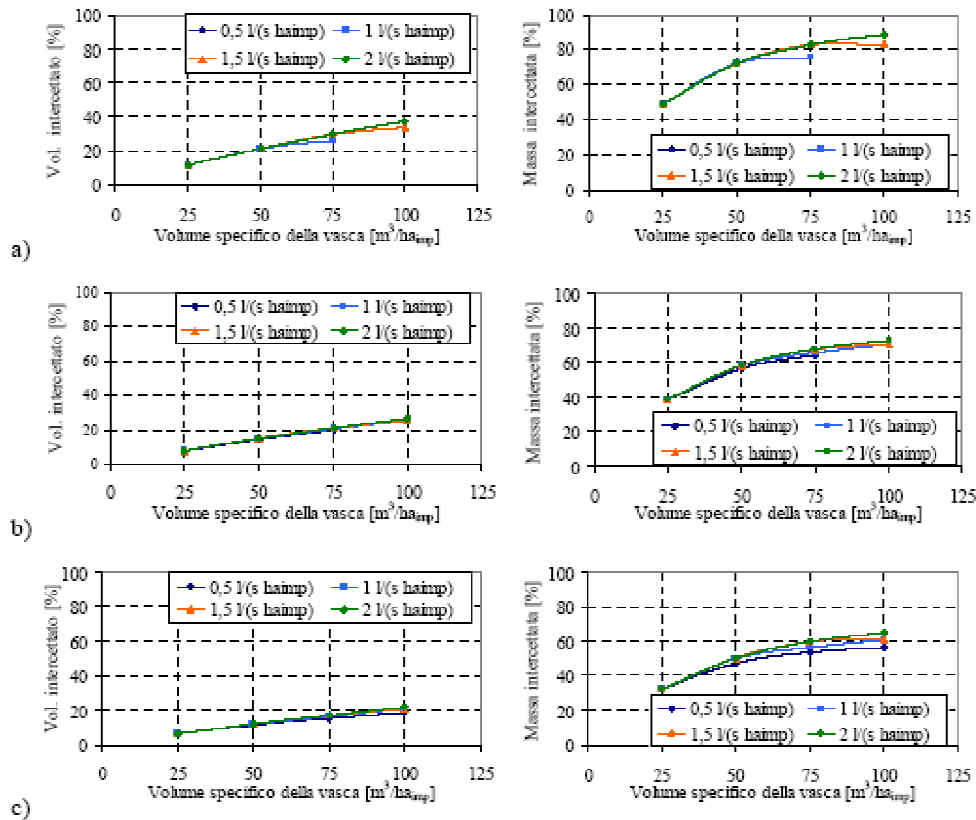


Figura 13: svuotamento intermittente con interruzione. Percentuale di volume e massa intercettati al variare del volume della vasca e della portata di svuotamento per: a)  $t_{tot}=24$  ore, b)  $t_{tot}=48$  ore, c)  $t_{tot}=96$  ore (Ciapponi et al., 2005)

### 2.6.5 Efficienze delle vasche di prima pioggia

Per efficienza di rimozione di una vasca di prima pioggia si intende il rapporto tra la massa di inquinante intercettata e la massa di inquinante in ingresso alla vasca.

$$(2.7)$$

Dove  $M_{in}$  è la massa di inquinante in ingresso, e dipende dal bacino e dalla rete in esame, mentre  $M_{out}$  è la massa in uscita, che dipende dal funzionamento della vasca di prima pioggia.

Grazie ad alcuni studi presenti in letteratura, su un numero significativo di bacini italiani, è stato possibile dedurre alcuni aspetti che influenzano la capacità delle vasche di intercettare massa inquinante. In particolar modo verranno ora esposti gli effetti che l'evento di pioggia e la tipologia di vasca hanno sul funzionamento del dispositivo.

Vengono riportati i risultati dello studio compiuto da Olivieri et al, (2000), che mostrano l'influenza dell'evento di pioggia sul rendimento della vasca. In figura 2.14 sono mostrate delle curve rendimento-durata ricavate andando a considerare le stesse tipologie impiantistiche considerate nel lavoro di Ciaponi e Papiri.

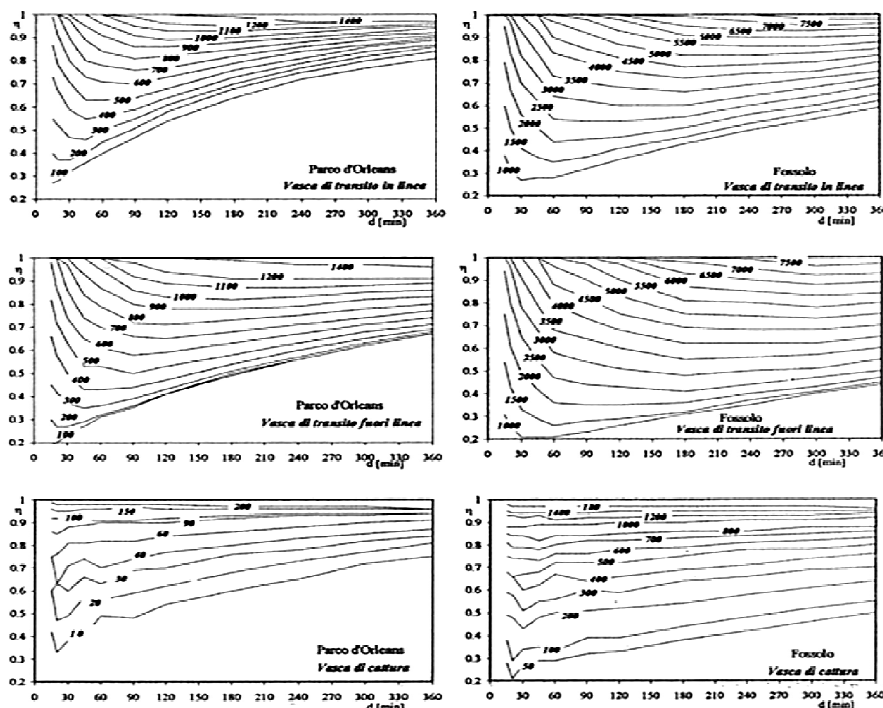


Figura 2.14: andamento del rendimento di rimozione in funzione della durata, per due località e diversi schemi impiantistici, Olivieri et al, (2000),

Come si nota in tutti i diagrammi, si possono individuare dei minimi di rendimento in corrispondenza di una certa durata, che sarà quindi assunta come durata dell'evento

critico. Ogni curva presente nei diagrammi si riferisce a un diverso volume utile della vasca, come è logico aspettarsi, all'aumentare di questo parametro aumentano i rendimenti e il valore della durata critica. È stato dimostrato inoltre come la durata critica non sia molto influenzata dal tipo di ietogramma, anche se presenta un comportamento leggermente peggiore per ietogrammi triangolari con picco anticipato.

Come già mostrato nel paragrafo 2.6.4, la tipologia di vasca influenza la capacità di rimuovere SST, si è visto come i rendimenti di rimozione crescano in modo significativo fino a  $50 \text{ m}^3/h_{\text{imp}}$  di volume, mentre per successivi aumenti il beneficio sia sempre più ridotto. Anche la tipologia di vasca influenza notevolmente il rendimento di rimozione, in particolar modo si è notato come al crescere dei volumi si abbia un aumento dell'efficienza più lento per le vasche di transito rispetto alle vasche di cattura, e, in ogni caso, le vasche di cattura presentano rendimenti molto più elevati in occorrenza del fenomeno del first flush (figura 2.8).

Il dimensionamento delle vasche di prima pioggia deve essere studiato applicando i criteri di stream standard prescritti dalla normativa e, per rispettare questi limiti, può essere necessario, oltre a fissare l'efficienza della vasca, limitare il numero di scarichi annui verso il ricettore, andando a considerare la capacità di auto depurazione del corpo idrico.

### 2.6.6 modellazione delle vasche di prima pioggia

In conclusione a questa parte del lavoro, si riportano alcuni modelli utilizzati per valutare l'efficienza di cattura delle vasche di prima pioggia. In ordine di complessità crescente verrà esposto il modello a completa miscelazione e successivamente sarà illustrato il modello di dimensionamento di un sedimentatore, per valutare anche questo aspetto.

- Completa miscelazione: è il modello più semplificato per descrivere la concentrazione delle sostanze inquinanti in vasca, in quanto considera la concentrazione dei solidi sospesi costante in tutto il volume invasato. Nel caso di vasca di transito verrà quindi considerata con la stessa concentrazione l'acqua presente in vasca, quella recapitata al depuratore, e, una volta avvenuto il riempimento totale dell'invaso, anche quella inviata al ricettore. Se in vasca passa solo parte dell'idrogramma, e di conseguenza del pollutogramma, come succede nelle vasche di cattura, verrà utilizzata la massa intercettata per

calcolare la concentrazione della portata inviata a depurazione, mentre il resto del carico inquinante contenuto nelle acque di seconda pioggia sarà scaricato al ricettore.

- Sedimentatore: le vasche di prima pioggia possono essere assimilate a dei sedimentatori, per valutarne al meglio il dimensionamento. Verrà ora esposto il metodo di dimensionamento di sedimentatori fognari, e le leggi che ne governano il funzionamento. Si va a valutare la velocità di sedimentazione dei granuli maggiori, che dipenderà dal bilancio delle forze agenti sulla particella. Per descrivere il moto della particella si considererà la sola velocità orizzontale, escludendo dalla trattazione le turbolenze dei punti singolari della vasca, quali l'immissione e lo scarico.

La velocità della particella è data dalla somma vettoriale della componente orizzontale e della componente verticale di caduta. Date le semplificazioni utilizzate, la prima è esprimibile come segue.

$$v = \frac{Q_{in}}{A} \quad (2.8)$$

Dove  $v$  indica la velocità orizzontale,  $Q_{in}$  la portata in ingresso alla vasca e  $A$  la sezione della condotta di ingresso alla vasca. La componente verticale della velocità può essere ottenuta con un bilancio delle forze agenti sulla particella, uguagliando rispettivamente la forza peso ( $F_p$ ) della particella immersa e la resistenza al moto fornita dal liquido circostante ( $F_r$ ).

$$F_p = (\rho_s - \rho)gV \quad (2.9)$$

$$F_r = C_d a \frac{\rho u^2}{2} \quad (2.10)$$

Dove  $\rho$  e  $\rho_s$  sono rispettivamente il peso specifico dell'acqua e della particella,  $V$  è il volume della particella,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $u$  è la velocità verticale mentre  $C_d$  è il coefficiente di drag e  $a$  è la sezione retta della particella. Se si impone l'uguaglianza tra le due forze, si può ricavare facilmente la velocità di caduta:

$$u = \sqrt{\frac{2(\rho_s - \rho)gV}{C_d a \rho}} \quad (2.11)$$

Ipotizzando la particella sferica e introducendo la dipendenza del coefficiente di drag dal numero di Reynolds, in caso di moto laminare si ottiene la legge di Stokes:

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad \rightarrow \quad u = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2}{18\mu} \quad (2.12)$$

Nel caso di moto non laminare si può utilizzare la formulazione proposta da Bonomo (2005) per il coefficiente di drag.

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re} + 0,34 \quad (2.13)$$

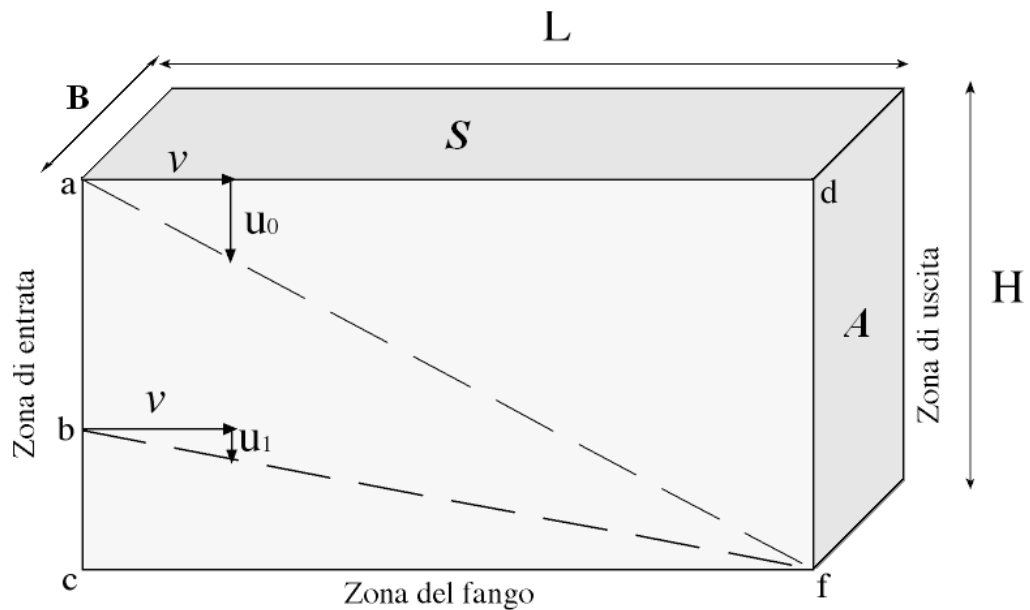


Figura 2.15: schema del processo di sedimentazione in una vasca

La figura 2.15 mostra lo schema di funzionamento di un sedimentatore: il percorso a-f è quello relativo alla più piccola particella sedimentabile con velocità  $u_0$ , dal punto di ingresso più sfavorevole all'ultima sezione utile per il deposito. Ogni particella con un diametro maggiore di quella caratterizzata da velocità verticale  $u_0$ , presenterà anche una velocità di caduta maggiore, quindi riuscirà sicuramente a sedimentare.

Operando delle considerazioni sul tempo di percorrenza verticale e orizzontale della particella, si possono ricavare delle considerazioni sulla percentuale di materiale sedimentabile.

$$\frac{H}{u_0} = \frac{L}{v} \quad (2.14)$$

Sostituendo la definizione della velocità orizzontale (2.8) nella (2.14) e semplificando, si può ottenere la seguente relazione

$$\frac{H}{u_0} = \frac{LHB}{Q} \rightarrow u_0 = \frac{Q}{S} \quad (2.15)$$

La notazione utilizzata riprende quella in figura 2.15, il risultato ottenuto mostra come il parametro  $u_0$  che è strettamente legato alla capacità di sedimentazione delle particelle, dipenda unicamente dalla superficie della vasca. Se le particelle sono più sottili di quelle con  $u_0$ , per potersi sedimentare dovranno compiere un tragitto verticale più basso. Questo significa che va individuato un punto di immissione ( $b$ ) tale da consentirne la sedimentazione. La percentuale di rimozione sarà data dalla formula di Hazon.

$$Z = \frac{ab}{bc} = \frac{u_1}{u_0} = u_1 \frac{S}{Q} \quad (2.16)$$

Si può quindi calcolare l'efficienza del sedimentatore, intesa come il rapporto tra la quantità di materiale sedimentato e la quantità di materiale sedimentabile.

$$\eta = (1 - Z) \int_0^Z u \frac{S}{Q} dz \quad (2.17)$$

Nella quale  $Z$  è la percentuale di solidi sospesi con velocità  $u > u_0$ .

L'applicazione pratica di quest'ultimo tipo di modellazione alle vasche di prima pioggia risulta molto complicata, perché presuppone la conoscenza della granulometria del sedimento in ingresso all'invaso. Per questo motivo è più semplice e sicuro applicare il modello della completa miscelazione

## 2.7 Realizzazione di idrogrammi e pollutogrammi

Un passo fondamentale nell'analisi del funzionamento delle vasche di prima pioggia consiste nella realizzazione degli idrogrammi di piena e dei pollutogrammi, che permettono di valutare i volumi e le concentrazioni in ingresso all'invaso. In questo paragrafo verranno esposti i metodi utilizzati per ricavare tali fattori, negli studi alla base di questo lavoro. Verranno prima esposti i modelli utilizzati per la costruzione degli idrogrammi di piena, e in seguito quelli per la realizzazione dei pollutogrammi.

### 2.7.1 Idrogrammi di piena

Un idrogramma è una funzione che descrive l'andamento nel tempo delle portate, a una determinata sezione di chiusura del bacino in esame. Prevedere l'andamento delle portate risulta importante, soprattutto perché permette di identificare la situazione più gravosa per la sezione in esame, sia esso un corpo idrico o, come nel caso di interesse per questo studio, un collettore fognario. Tale situazione è chiamata picco di piena e grazie all'idrogramma se ne può determinare sia l'intensità che l'istante di arrivo. Per questo studio è importante la prima parte dell'idrogramma, quella caratterizzata da first flush, che identifica le portate contraddistinte dal massimo carico inquinante.

La forzante per la formazione di un idrogramma è la precipitazione, risulta dunque necessario identificare un evento di progetto. Se si parla di vasche di prima pioggia, l'evento di progetto deve necessariamente avere tempi di ritorno molto brevi, in particolare per alcuni studi sono stati presi in considerazione tempi di ritorno di 5, 2 e meno di 1 anno, (Arrigoni e Villa, 2009), in quanto l'elevata frequenza fa sì che risultino i più incisivi per le masse di inquinante scaricate nei corpi idrici ricettori.

### Stima della precipitazione

Il metodo più utilizzato per la stima degli eventi di pioggia, con un determinato tempo di ritorno, sono le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP), che mettono in relazione intensità e durata di un evento. La formulazione generale di queste funzioni è la seguente.

$$i = a\theta^{n-1} \quad (2.18)$$



Dove con  $i$  si intende l'intensità di pioggia, mentre con  $\theta$  si indica la durata dell'evento;  $a$  e  $n$  sono dei parametri ottenuti grazie a una regressione statistica sui dati di pioggia disponibili per la zona in esame. Il valore di tali parametri è fornito dall'autorità di bacino del Po, con una discretizzazione del territorio in celle quadrate da 2 km di lato, e per tempi di ritorno di 20, 50, 100 e 200 anni. Come già detto in precedenza per questo studio sono necessari dati con tempi di ritorno molto inferiori, viene quindi ora riportato il metodo proposto da Albizzati Mantegazza et al., (2007), per la stima di tali parametri. Il bacino di studio è quello del torrente Bevera a nord di Milano nelle provincie di Como e Lecco, con un'estensione di circa 20 km<sup>2</sup> e una lunghezza del tronco principale di 5,5 km.

Le LSPP mettono in relazione intensità e durata di un evento di pioggia con un assegnato tempo di ritorno. Questo metodo tende a sovrastimare le intensità di pioggia per le durate minori di un'ora, vanno quindi applicati dei coefficienti riduttivi (Calenda et al.,1993).

**Tabella2.3: coefficienti riduttivi per le durate inferiori all'ora**

$\theta$ [min]	$h_{\theta}/h_1$
5	0.28
10	0.44
17	0.56
25	0.75
45	0.89

Oltre alla correzione per le durate brevi occorre ricavare le curve per bassi tempi di ritorno. A tale scopo si ricava la probabilità associata ai tempi di interesse tramite la seguente formula.

$$P = 1 - 1/T_r \quad (2.19)$$

Dalla (2.19) risulta evidente che, per tempi di ritorno di un anno, la probabilità sarebbe nulla quindi per questi eventi verrà utilizzata una procedura differente. A questo punto si utilizza la distribuzione di Gumbel per mettere in relazione l'altezza di pioggia in funzione della probabilità di accadimento, e quindi del tempo di ritorno.

$$F_h(h) = \exp\{-\exp[\alpha(h - u)]\} \quad (2.20)$$

$$h = u - \frac{\ln(-\ln(P))}{\alpha} \tag{2.21}$$

Dove  $h$  indica l'altezza di pioggia relativa a un evento di durata  $\theta$ . Invertendo la formula si può esplicitare  $h$  in funzione della probabilità di non superamento. Ora, utilizzando i valori di altezza relativi a durata pari a un'ora, ricavati dalle LSPP con 20, 50, 100 e 200 anni, si possono stimare i parametri della Gumbel  $\alpha$  e  $u$ . Noti questi parametri, si può ricostruire la funzione generale e ricavare le altezze di pioggia relative ai tempi di ritorno desiderati. Note le altezze orarie per  $T= 2$  e 5 anni si ricavano i nuovi parametri delle LSPP, il parametro  $a$  corrisponde al dato estratto dalla Gumbel, mentre l'esponente di scala  $n$  può essere considerato costante in quanto debolmente influenzato dal tempo di ritorno. Per ricavare le altezze di pioggia per eventi con tempo di ritorno pari a un anno, si dimezzano quelle relative a  $T$  pari a 2 anni: data la relazione logaritmica tra i parametri e il tempo di ritorno, si può assicurare che la LSPP costruita in questo modo sia relativa a eventi che occorrono più volte nello stesso anno (Arrigoni e Villa, 2009). Ottenuti i parametri, è necessario utilizzare i fattori di riduzione già citati, per ottenere i valori corretti per durate inferiori all'ora. Con questi valori si possono ricavare le curve corrette interpolando la seguente funzione a tre parametri

$$i(\theta) = \frac{A(T)}{(\theta+B(T))^{C(T)}} \tag{2.22}$$

In questo modo si possono ricavare le LSPP che riproducono accuratamente sia le brevi sia le lunghe durate. Un esempio di tali curve è riportato nel seguente grafico (Albizzati Mantegazza 2007).

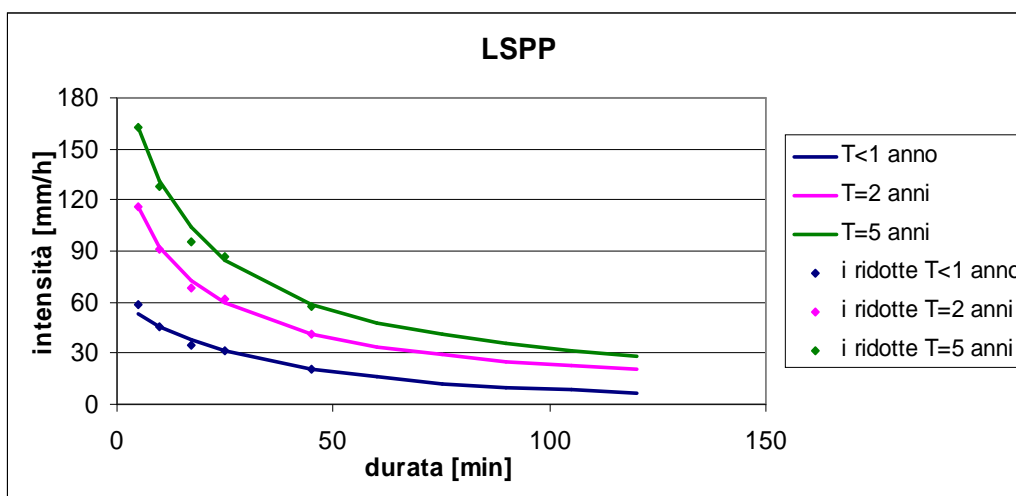


Figura 2.16: esempio di LSPP ricavate per tempi di ritorno di 5, 2 e inferiori a 1 anno (Albizzati Mantegazza, 2007)

Dal grafico in figura 2.16 si nota come anche per eventi molto frequenti, con lunghe durate, si ottengano comunque intensità di pioggia (10 mm/h) tali da consentire il dilavamento di buona parte dell'inquinante depositato sulle superfici (Paoletti et al., 2003).

Una volta ottenuta la relazione tra intensità e durata di pioggia, con assegnato tempo di ritorno, occorre dedurre da questo dato una funzione che descriva l'andamento della precipitazione, con assegnata  $i$ ,  $\theta$  e  $T$ , nel tempo. Tale funzione è detta ietogramma.

Come già detto in precedenza, l'input di pioggia è un parametro determinante per la generazione dell'idrogramma e del pollutogramma. Sono stati svolti degli studi per verificare la variabilità della massa di inquinante scaricata in funzione di questo dato. Alcuni autori hanno verificato il funzionamento delle vasche di prima pioggia al variare dello ietogramma utilizzato. Di seguito verranno riportati gli ietogrammi sintetici utilizzati da Arrigoni e Villa (2009), per la stima della precipitazione.

Il primo ietogramma che si vuole riportare è quello a intensità costante. Tale funzione ipotizza che l'intensità della precipitazione sia costante per tutta la durata dell'evento. L'intensità è dedotta direttamente dalle LSPP, per un'assegnata durata. Tale metodo tende a sottostimare i volumi totali, in quanto l'altezza definita nelle linee segnalatrici è la massima registrabile durante l'evento. Per questo motivo l'altezza presa in considerazione è uguale o minore all'altezza complessiva dell'evento, e la stima del volume è inferiore; in aggiunta a questo bisogna dire che l'altezza di picco di un evento reale risulta spesso maggiore di quella stimata. Una volta stimato lo ietogramma occorre definire quanta parte della precipitazione contribuisce a formare deflusso. Nel caso considerato si è utilizzato il metodo proporzionale, fissando in una quota costante la parte di precipitazione netta.

Il secondo ietogramma è quello denominato Chicago (Keifer e Chu, 1957), in quanto studiato appositamente per la fognatura della città statunitense. La peculiarità di tale metodo sta nel fatto che, per ogni durata dell'evento, l'intensità di pioggia media è congruente con quella indicata nelle LSPP. La formulazione matematica è la seguente.

$$\begin{cases} i(\theta_b) = na \left(\frac{\theta_b}{r}\right)^{n-1} & \text{prima del picco} \\ i(\theta_a) = na \left(\frac{\theta_a}{r}\right)^{n-1} & \text{dopo il picco} \end{cases} \quad (2.23)$$

Il volume totale di pioggia viene individuato, una volta assegnata la durata  $\theta_b$ , che coincide con il tempo prima del picco, direttamente dalle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica,  $\theta_a$  coincide invece con la durata post picco. La (2.23) mette in luce la presenza di due rami, uno ascendente e uno discendente (figura 2.17),  $r$  invece indica il rapporto tra il tempo prima del picco e la durata totale dell'evento, che dovrebbe essere individuato in base ad indagini statistiche, ma viene spesso posto pari a 0,3 o 0,4.

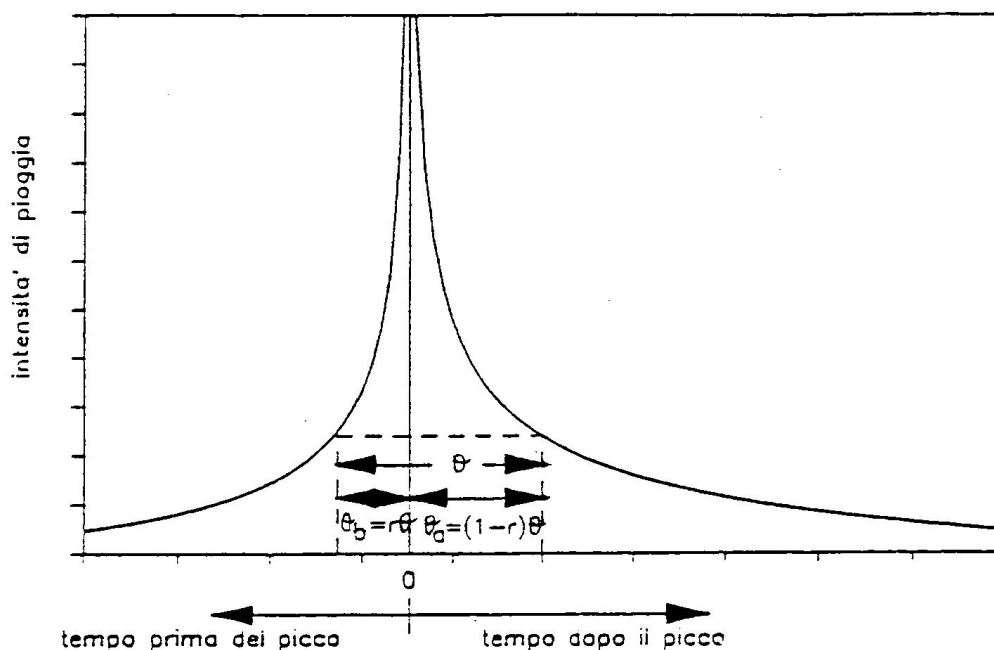


Figura 2.17: esempio di ietogramma Chicago

Il principale vantaggio di questo tipo di ietogramma è che non risente molto della variazione delle durate: la parte centrale corrispondente al picco rimane pressoché costante, mentre sono le code ad allungarsi o accorciarsi, a seconda della durata dell'evento. Lo ietogramma Chicago contiene in sé, proprio per il modo in cui è costruito, le piogge critiche per tutte le durate parziali minori della durata complessiva.

### Formazione dell'idrogramma

Nel lavoro preso in considerazione gli idrogrammi sono stati ricavati con il metodo della corrivazione, con curve aree tempi lineari, con procedimenti differenti:

- Chicago: è stato utilizzato il software *URBIS-Pro* per la valutazione degli IUH (idrogramma istantaneo unitario), successivamente si è calcolata la convoluzione con gli ietogrammi netti.

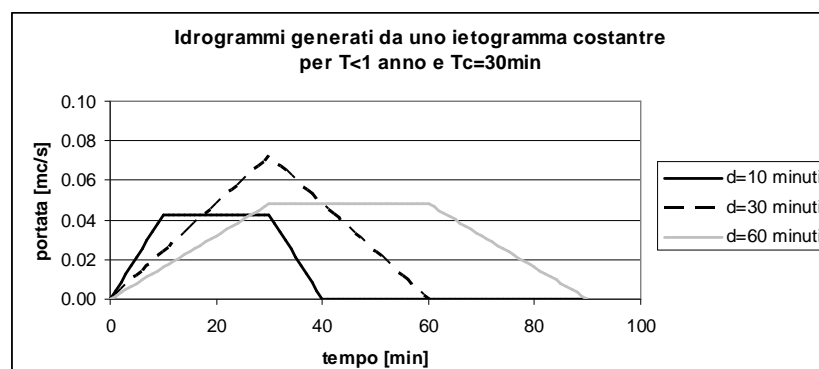
- Intensità costante: si è utilizzata la formula razionale per il calcolo della portata di piena in  $\text{m}^3/\text{s}$ , noto questo parametro, si è applicato il metodo citato, considerando l'intensità di pioggia costante.

$$Q = 0,2778 C i A_b \quad (2.24)$$

Dove  $C$  è il coefficiente di afflusso,  $i$  è l'intensità di pioggia in  $\text{mm}/\text{h}$  e  $A_b$  è l'area del bacino in  $\text{km}^2$ .

Il metodo della corrivazione si basa sull'assunzione del fatto che, durante la formazione del deflusso, prevalgano nel bacino i fenomeni di traslazione rispetto a quelli di invaso. Per questo motivo si adatta molto bene a bacini che presentano forti pendenze o a bacini impermeabili, come quelli in esame. Si basa sul tempo di corrivazione, e necessita l'individuazione della curva aree tempi. In questo caso è stata considerata una curva lineare, e rappresenta le aree comprese tra la sezione di chiusura e una generica linea isocorriva  $s$  al tempo  $t$ . L'andamento di  $s$  nel tempo è una curva crescente dalla sezione di chiusura del bacino sino al punto  $(S; T_c)$ , che identifica lo spartiacque del bacino,  $S$  rappresenta dunque la superficie del bacino e  $T_c$  è il tempo di corrivazione del bacino. L'IUH è determinato dalla derivata nel tempo della curva aree tempi in rapporto alla superficie  $S$ . In figura 2.18 sono riportati a titolo di esempio degli idrogrammi ottenuti con in ingresso ietogrammi costanti e Chicago.

$$u(t) = \frac{1}{S} \frac{ds(t)}{dt} \quad (2.25)$$



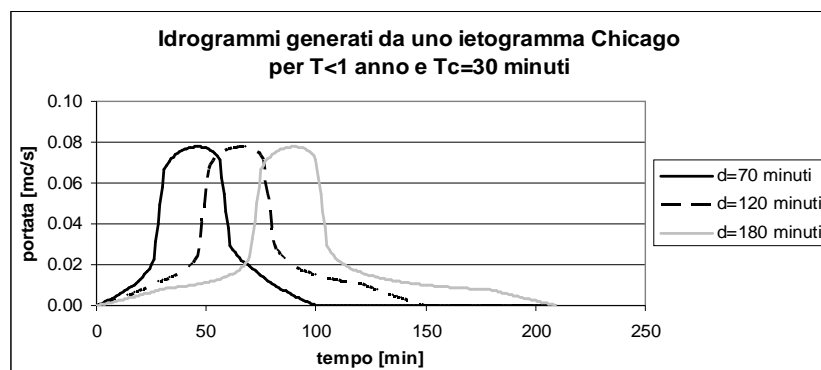


Figura 2.18: esempi di idrogrammi ottenuti in alto con ietogramma costante, mentre in basso con ietogramma Chicago

### 2.7.2 Pollutogrammi

Per poter realizzare un pollutogramma, l'andamento delle masse scaricate nel tempo a una determinata sezione di chiusura di un bacino, occorre considerare i due fenomeni che ne determinano la formazione. Saranno analizzati i processi di accumulo e di dilavamento, riportando la medesima procedura utilizzata da Albizzati Mantegazza (2007).

#### Processo di accumulo

Il processo di accumulo di inquinanti sulla superficie del bacino è regolato fondamentalmente dal tempo secco che intercorre tra due eventi di pioggia. Verrà ora riportato il modello proposto da Huber e Dickinson (1988)..

$$Ma(t) = \frac{Acc}{Disp} (1 - e^{-Disp t_s}) \quad (2.26)$$

Dove  $Ma$  è la massa accumulata sul bacino (kg/ha) in funzione del tempo secco antecedente, inteso come tempo equivalente, che deve tenere conto dell'effettivo tempo secco e anche del tempo necessario perché si accumuli l'inquinante a seguito di un evento piovoso.  $Acc$  e  $Disp$  sono due parametri che tengono conto dell'accumulo e della dispersione dell'inquinante sulla superficie del bacino e vengono espressi in kg/(ha·d) il primo e  $d^{-1}$  il secondo. Come intuibile, questi ultimi due parametri sono di difficile determinazione e in particolare il parametro di accumulo dipende dal tipo di bacino, dall'uso del suolo, dal tipo di attività presente, esistono studi che ne hanno determinato il valore per via sperimentale (Alley e Smith, 1981; Bujon e Herremans, 1990), in funzione dell'uso del suolo: per zone industriali ha un valore massimo di 35 kg/(ha·d),

per zone residenziali altamente abitate varia tra 10 e 25 kg/(ha·d), scendendo a 5-6 kg/(ha·d) se la zona è scarsamente edificata. Il parametro di dispersione è anch'esso molto complesso, in quanto dipende fundamentalmente da agenti atmosferici, come il vento. Studi diversi hanno dato risultati differenti, anche di un ordine di grandezza: Novotny et al. (1978, 1985) in un bacino statunitense ha ottenuto valori compresi tra 0.2 e 0.4 d<sup>-1</sup>, mentre sperimentazioni francesi (Bujon, 1988) invece lo stimano pari a 0.08 d<sup>-1</sup>. Di seguito viene riportato un esempio di curva di accumulo, tratto dallo studio di Arrigoni e Villa (2009).

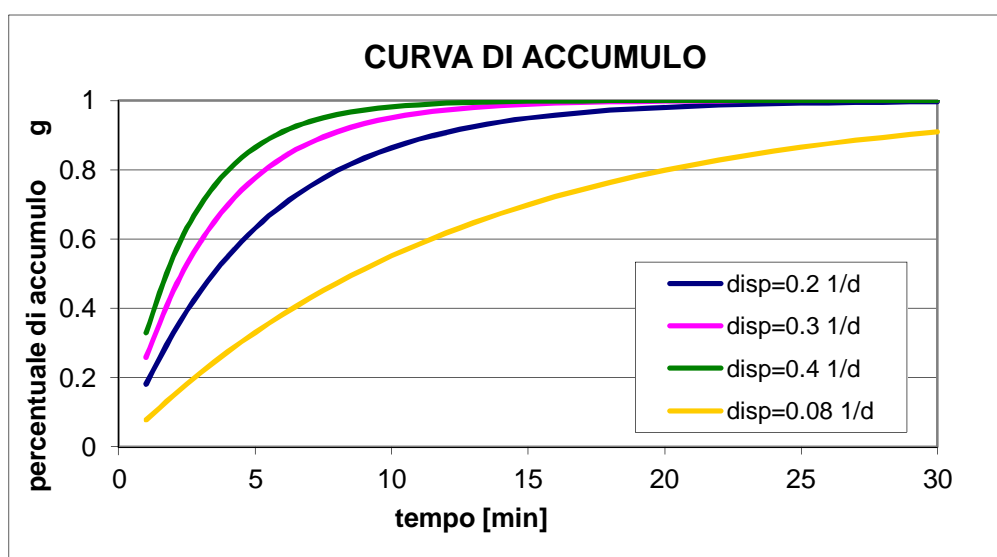


Figura 2.19: esempio di curve di accumulo

Nel grafico riportato è mantenuto costante il valore del parametro di accumulo, mentre è stato fatto variare il parametro di dispersione. L'accumulo è normalizzato rispetto al totale. Si nota come nel caso di accumulo più lento, con un parametro di dispersione pari a 0,08 d<sup>-1</sup> si abbia 80% dell'accumulo dopo soli 20 giorni di periodo secco, condizione abbastanza comune nei regimi pluviometrici del nord Italia. Per questo motivo si può ritenere raggiunto il valore asintotico della curva di accumulo a inizio evento, in modo da considerare l'intera massa depositata sulla superficie.

### Processo di dilavamento

Come già accennato, il dilavamento è un processo che dipende dalla precipitazione insistente sul bacino. Tipicamente la maggior parte del materiale viene dilavato nei primi istanti dell'evento, anche se, in alcuni casi, se la precipitazione non è uniformemente distribuita su tutto il bacino, può presentare un andamento diverso.

Il modello proposto nello studio considerato è l'SMMW (Huber 1986), che si basa sulla seguente equazione differenziale.

$$\frac{dM_d(t)}{dt} = -\frac{dM_a(t)}{dt} = M_a(t) Arra i(y)^{wash} \quad (2.27)$$

Che integrata diviene:

$$M_d(t + \Delta t) - M_d(t) = M_a(t) (1 - \exp(-Arra i(y)^{wash} \Delta t)) \quad (2.28)$$

Dove:

- $M_d(t+\Delta t)$  rappresenta la massa dilavata al tempo  $t+\Delta t$  in (kg/ha);
- $M_d(t)$  la massa dilavata nel tempo  $t$  (kg/ha);
- $M_a(t)$  è la massa accumulata sul bacino fino al tempo  $t$  (kg/ha);
- $i(t)$  è l'intensità media di pioggia;
- $Arra$  è il coefficiente di lavaggio in (lunghezza<sup>-wash</sup>·tempo<sup>(wash-1)</sup>).
- $wash$  è adimensionale e rappresenta la velocità di dilavamento delle sostanze.

I parametri di taratura di questo modello  $Arra$  e  $wash$  dipendono dalla sostanza dilavata, dal bacino e dall'evento meteorico. Secondo alcuni studi  $Arra$  può variare tra 2.9 e 9.3 pollici<sup>-wash</sup>ora<sup>(wash-1)</sup> per materiali sedimentabili (Ammon, 1979), mentre assume valori minori per sostanze disciolte (Sueishi et al., 1984). Alcuni studi hanno dimostrato come questo sia il vero parametro di calibrazione in quanto gli altri risultano poco influenti sul modello (Artina e Maglionico, 1998). Per quanto riguarda il parametro  $wash$  invece varia tra 1 e 3 per sostanze sedimentabili (Huber, 1986) e fra 0 e 1 se si considerano le sostanze solubili (Nakamura, 1984). Data la grande difficoltà nella stima di tali parametri, i valori solitamente adottati in letteratura sono 1 per  $wash$  e 0.18 mm<sup>-1</sup> per  $Arra$ , l'unità di misura di quest'ultimo parametro è tale da adimensionalizzare la potenza dell'esponenziale.

Di seguito un esempio di curva di dilavamento in funzione del tempo, tratto dallo studio di Arrigoni e Villa (2009).



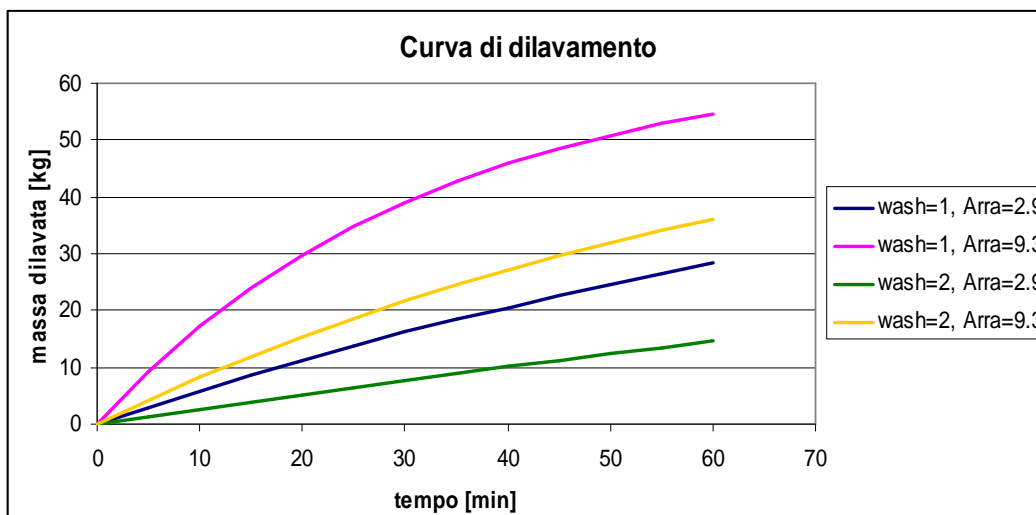


Figura 2.20: esempio di curve di dilavamento al variare del parametro wash

A questo punto si è esposto come ricavare gli idrogrammi e la curva di dilavamento. Per realizzare i pollutogrammi bisogna associare le due informazioni: da un lato si hanno i volumi di acqua nel tempo, mentre dall'altro si sono ottenute le masse dilavate nel tempo, risulta immediato ricavare le concentrazioni di inquinante presenti nelle portate meteoriche drenate. Nel seguito si riportano un esempio di pollutogramma ottenuto con ietogrammi costante.

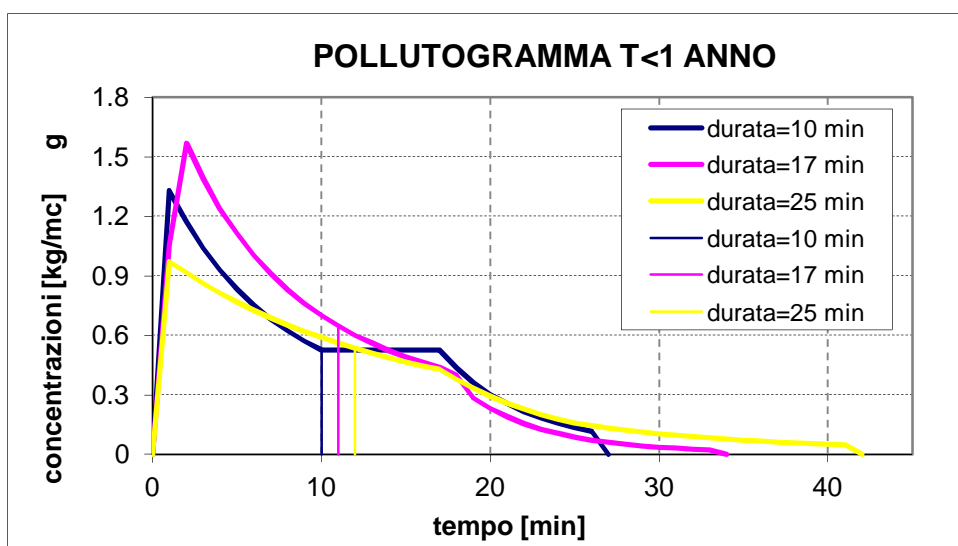


Figura 2.21: pollutogramma ottenuto con ietogramma costante, per tempi di ritorno minori di un anno e diverse durate.

## 2.8 Studi precedenti

Si vogliono ora riportare alcuni dei risultati ottenuti nel già citato studio di Arrigoni e Villa (2009). In tale lavoro sono state confrontate le prestazioni delle tre tipologie di vasca descritte nel paragrafo 2.6.1, dimensionate con la normativa, al variare di alcuni parametri, quali tempo di ritorno e durata dell'evento, tempo di corrivazione del bacino e ietogramma utilizzato. Le simulazioni sono state eseguite applicando le procedure e i modelli fin qui esposti. La fognatura è stata considerata pluviale, onde evitare la stima della portata nera, che avrebbe tolto generalità alla trattazione.

Per prima cosa vengono qui riportati i confronti eseguiti in merito alle efficienze di rimozione, definite in precedenza, delle differenti tipologie di vasca, calcolate a parità di ietogramma, tempo di corrivazione, tempo di ritorno e modalità di dimensionamento. In particolare sono qui riportati i grafici relativi a  $T_c$  pari a 45 minuti,  $T_r$  pari a 2 anni, per vasche dimensionate per intercettare i primi 5 mm di precipitazione, e i due diversi tipi di ietogramma descritti (paragrafo 2.7.1).

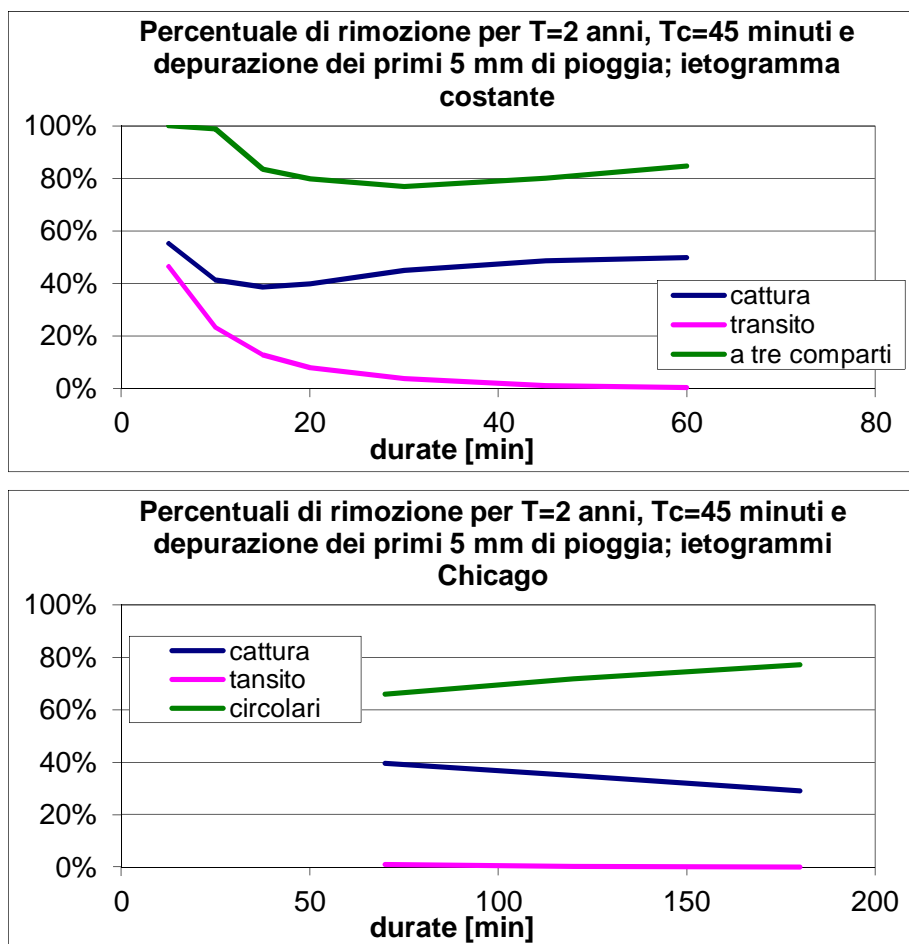


Figura 2.22: confronto delle efficienze di rimozione delle diverse tipologie di vache, in alto con ietogramma costante, in basso con ietogramma Chicago

La figura 2.22 mette in evidenza come le vasche di transito risultino in ogni caso inadeguate, con efficienze di rimozione molto basse. La soluzione migliore in questo caso risulta essere, con entrambi gli ietogrammi, la vasca a tre compartimenti, che presenta anche il 20% in più di efficienza rispetto alla vasca di cattura. Oltre a questo va detto che il funzionamento in automatico di questo tipo di vasca è un ulteriore elemento positivo, in quanto riduce di molto i costi di investimento per la sua installazione.

Il secondo aspetto da considerare, oltre l'efficienza di rimozione, è il volume di acqua inviata al depuratore; ciò, come già spiegato in precedenza, influisce sul costo di esercizio dell'impianto di trattamento, principale svantaggio che caratterizza le vasche a tre compartimenti. Se da un lato assicurano efficienze di rimozione molto alte, dall'altro inviano a depurazione grandi volumi d'acqua.

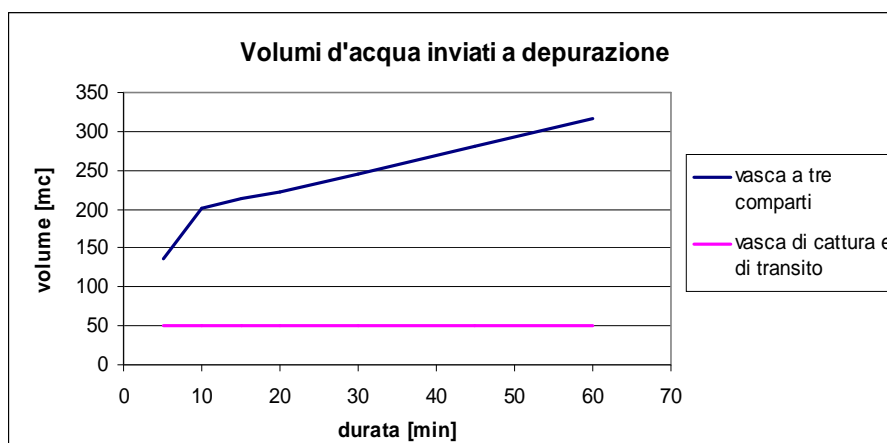


Figura 2.23: volumi d'acqua inviati a depurazione in funzione della durata per i diversi tipi di vasca per uno ietogramma costante con tempo di ritorno pari a 5 anni e tempo di corrivazione 60 minuti.

Nel grafico sopra riportato, si nota come i volumi inviati a depurazione siano decisamente maggiori per la vasca a tre compartimenti, arrivando a essere anche sei volte superiori per durate di circa un'ora.

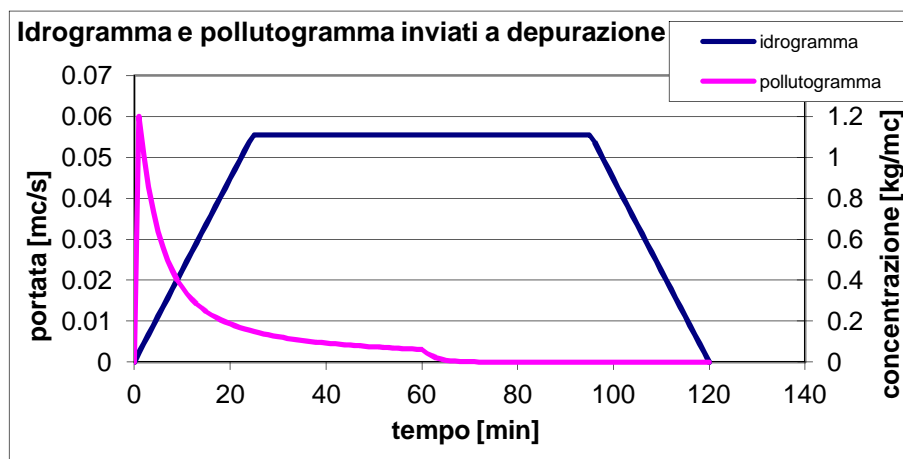


Figura 2.24: pollutogramma e idrogramma inviati a depurazione per una vasca a tre compartimenti, in caso di ietogramma costante con tempo di ritorno pari a 5 anni e tempo di corrivazione 60 minuti.

Considerando poi che la maggior parte dell'idrogramma inviato a depurazione da una vasca a tre comparti risulta poco inquinato, come osservabile in figura 2.24, si può concludere che la soluzione di miglior compromesso tra efficienza e oneri di gestione sia quella della vasca di cattura.

Tutte le considerazioni fin qui fatte si riferiscono a simulazioni in cui l'evento di pioggia è stato ricavato tramite analisi statistiche. Nello studio sono state eseguite delle verifiche su eventi di pioggia reali, per verificare se le simulazioni siano affidabili. A titolo di esempio vengono riportati alcuni idrogrammi e pollutogrammi relativi a eventi estivi e invernali, ricavati con il medesimo procedimento esposto in precedenza, con la differenza che l'input di pioggia siano dati realmente registrati.

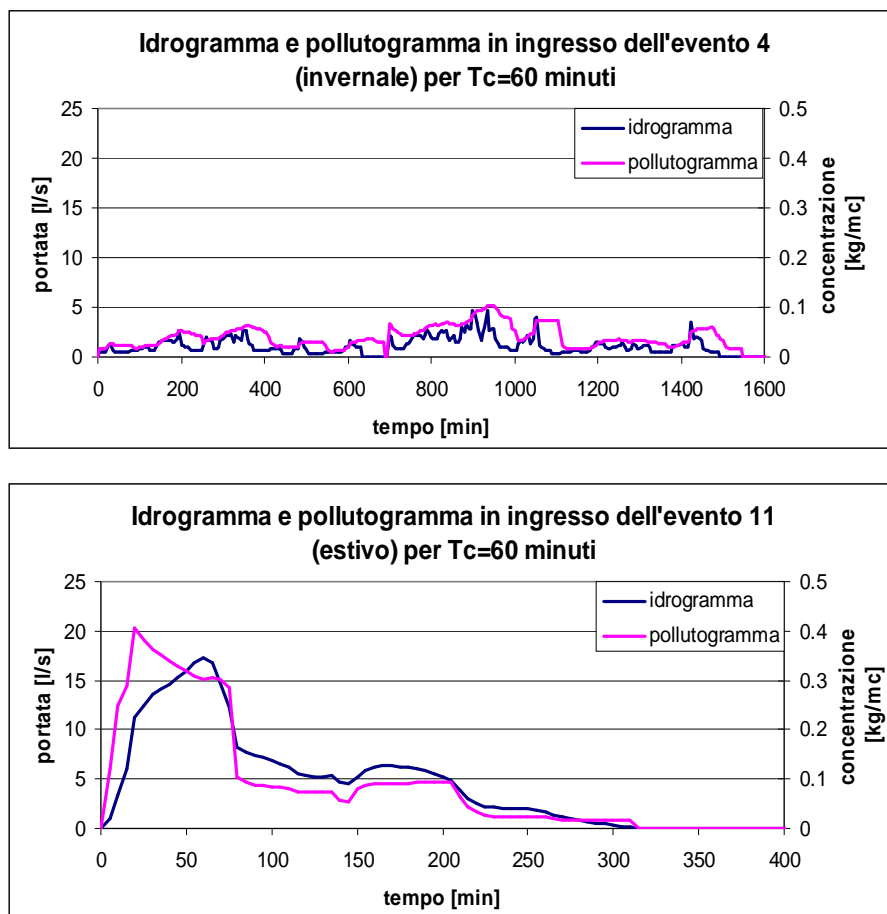


Figura 2.25: idrogrammi e pollutogrammi ricavati con dati di pioggia reali, per evento invernale e estivo.

Se si confrontano questi grafici con quelli desunti, ad esempio, dal grafico in figura 2.21, ricavato con un idrogramma costante, si nota come per l'evento estivo il pollutogramma presenti una forma paragonabile, mentre per l'evento invernale questo

non si possa affermare. Questo è dovuto al fatto che in eventi reali, soprattutto per eventi frontali caratterizzanti le precipitazioni invernali, non si verifica sempre il fenomeno del first flush, alla base delle trattazioni pregresse.

In conclusione si può affermare che gli elementi più incisivi sulla modellazione sono i parametri di dilavamento *Arra* e *wash*, e lo ietogramma sintetico in ingresso. La verifica con eventi reali mette infatti in luce come, soprattutto in eventi invernali, l'assenza del first flush pregiudichi completamente l'efficacia delle vasche di prima pioggia, a prescindere dalle loro dimensioni.

## 2.9 Conclusioni

Nella prima parte di questo capitolo è stata dimostrato come, per il raggiungimento degli obiettivi posti dalla direttiva comunitaria 2000/60/CE, sulla buona salute dei corpi idrici superficiali, sia determinante l'intercettazione delle acque di prima pioggia formatesi in seguito a un evento meteorico, caratterizzate da un maggior carico inquinante a causa del dilavamento delle superfici e della risospensione del materiale sedimentato in rete. La natura di tali inquinanti è differente, a seconda che si consideri come fonte il bacino o il deposito nei collettori fognari, grazie alle relazioni proposte è tuttavia possibile limitare la trattazione ai soli solidi sospesi totali.

Per intercettare la prima parte della portata meteorica sono stati messi a punto dei dispositivi atti a intercettare le acque di first flush, chiamate vasche di prima pioggia. Tali manufatti possono essere di diverso tipo, e il loro dimensionamento è regolato in Italia da normative regionali. Alcuni studi hanno dimostrato come prendere come valore di dimensionamento solo l'area del bacino risulti insufficiente ai fini preposti.

Sono stati poi riportati i risultati di studi che identificano la miglior soluzione costruttiva, ma che ne dimostrano, una volta confrontate le simulazioni delle prestazioni con eventi reali, l'inadeguatezza, soprattutto nel caso di eventi invernali caratterizzati da basse intensità e durate più lunghe che non determinano il fenomeno di first flush.

In conclusione sono stati identificati, nei parametri di dilavamento e negli ietogrammi utilizzati, i fattori che maggiormente incidono sull'efficienza delle vasche.

Basandosi su quanto riportato questo lavoro, si propone di studiare uno ietogramma che permetta di simulare più accuratamente l'andamento di eventi reali.

## Capitolo 3:

# GENERAZIONE DI SERIE SINTETICHE DI PIOGGIA

### 3.1 Introduzione

Nella progettazione idraulica la stima della precipitazione ha sempre ricoperto un ruolo cruciale, in quanto forzante principale del fenomeno di formazione delle piene. In assenza di dati di portata, infatti, si valuta l'altezza di pioggia e, tramite un modello che trasforma gli afflussi meteorici di un bacino in deflussi a una determinata sezione di chiusura, si costruisce l'idrogramma di piena. Mentre per moderni sistemi di allerta meteo si utilizza una previsione deterministica o pseudo deterministica della precipitazione, basata su complessi modelli numerici fisicamente basati, per la progettazione di opere idrauliche si può utilizzare un dato di progetto ricavato mediante l'analisi statistica delle serie storiche di precipitazione disponibili. L'analisi più comunemente utilizzata consiste nel creare le Linee Segnatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP), che correlano altezza e durata di pioggia per un fissato tempo di ritorno. In questo modo, una volta determinata la durata critica<sup>1</sup>, relativa al bacino in esame, è possibile ricavare la relativa altezza di pioggia. Un ulteriore e innovativo metodo per la stima della precipitazione si basa sulla generazione di eventi meteorici sintetici statisticamente indistinguibili da quelli reali.

Le tecniche di generazione stocastica di eventi meteorici si sono sviluppate negli ultimi decenni per rispondere alla necessità di una simulazione in continuo, su base annuale ad esempio, del campo di pioggia. I maggiori sforzi sono stati compiuti per

---

<sup>1</sup> Per durata critica si intende la durata di pioggia che massimizza l'idrogramma alla sezione di chiusura, può essere ricavato mediante la somma del  $t_f$  (tempo di formazione del deflusso) e del  $t_c$  (tempo di corrvazione, cioè il tempo necessario per una goccia d'acqua caduta nel punto più lontano del bacino, idrologicamente parlando, a raggiungere la sezione di chiusura).

incorporare nella struttura dei modelli stocastici di simulazione le caratteristiche fisiche degli eventi di pioggia. I fenomeni di precipitazione sono dunque schematizzati con due processi distinti: un primo che descrive l'arrivo dell'evento meteorico e un secondo che determina l'altezza di pioggia per ogni evento (Cox e Isham, 1980; Rodriguez-Iturbe, 1984).

I modelli che seguono questa logica sono distinguibili in tre categorie, a seconda del modo in cui viene schematizzato l'arrivo dell'evento meteorico: una prima classe considera le sequenze di periodi asciutti e bagnati, un'altra rappresenta il fenomeno con serie temporali discrete, mentre l'ultima utilizza processi puntuali.

Proprio quest'ultima categoria risulta particolarmente interessante per la sua capacità di riprodurre in continuo il fenomeno e incorporare nella sua struttura le caratteristiche fisiche del processo di precipitazione.

### **3.2 Modelli di precipitazione a processi puntuali**

Come accennato, il processo di precipitazione è schematizzabile in due parti principali, una prima che descrive l'arrivo dell'evento di precipitazione, che può essere assimilato all'arrivo di un fronte atmosferico, e una seconda che riproduce l'altezza di pioggia. L'innovazione di questi modelli sta nel descrivere la precipitazione attribuendo ai parametri fisici che la descrivono (es. intensità o durata) distribuzioni di probabilità. I diversi modelli si differenziano per il modo in cui descrivono questi aspetti.

Per quanto riguarda il processo di arrivo degli eventi meteorici esistono due approcci: modelli che utilizzano processi poissoniani (Todorovic e Yevjevich, 1969), e altri che descrivono il carattere cluster, vale a dire il manifestarsi a gruppi degli eventi meteorici. In generale questi modelli ipotizzano un'occorrenza omogenea dei fenomeni. Questa caratteristica rende necessario compiere diverse analisi per i periodi dell'anno con caratteristiche climatiche differenti, in modo da avere valutazioni adeguate, e cogliere le variazioni stagionali del clima. In letteratura sono disponibili diversi studi che valutano le caratteristiche del processo di precipitazione, sia per ogni mese dell'anno (Cowpertwait et al., 1996a,b; Grimaldi e Napolitano, 2002), sia per stagioni (Fowler et al, 2000). Per la seconda componente con cui è descritto il fenomeno di precipitazione, vale a dire la caratterizzazione della singola cella di pioggia, vengono usati due criteri: il primo considera la singola pioggia come un impulso istantaneo (processi White Noise). il secondo che invece considera un impulso con determinata intensità e durata (processi



Rectangular Pulse). La combinazione tra i diversi approcci dà luogo ai diversi modelli; fra i quali verranno brevemente esposti i più citati in letteratura.

Possono essere identificate quattro classi principali di modelli, ogni descrizione è seguita da un grafico con un esempio di generazione di serie di pioggia:

- Modelli Poisson White Noise (PWN): combinano un arrivo poissoniano dell'evento di precipitazione con impulsi di tipo istantaneo, la cui altezza  $H$  è una variabile aleatoria distribuita come un esponenziale (versione 1) o una gamma (versione 2).

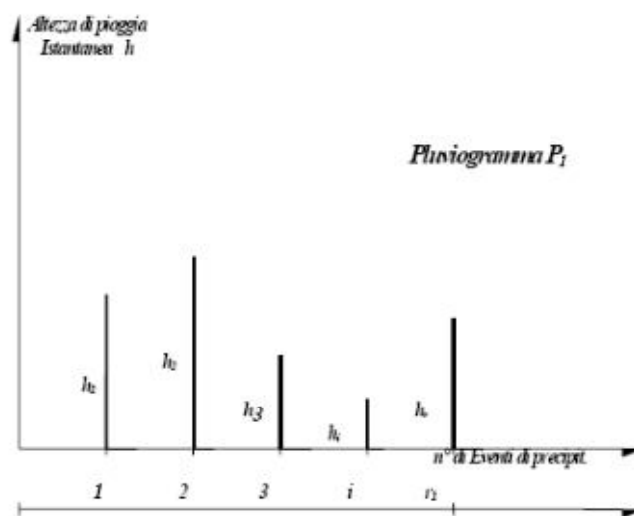


Figura 3.1: esempio di pluviogramma generato con un modello PWN

- Modelli Poisson Rectangular Pulse (PRP): come il precedente descrive l'arrivo degli eventi come un processo poissoniano (Rodriguez-Iturbe, 1984), al contrario gli eventi di pioggia sono schematizzati con impulsi rettangolari, con determinate distribuzioni marginali: l'intensità  $I$  è una variabile aleatoria distribuita esponenzialmente, mentre la durata  $D$  è descritta da una legge esponenziale negativa (versione 1) o da una distribuzione di Pareto (versione 2 o PPRP: Poisson Pareto Rectangular Pulse).

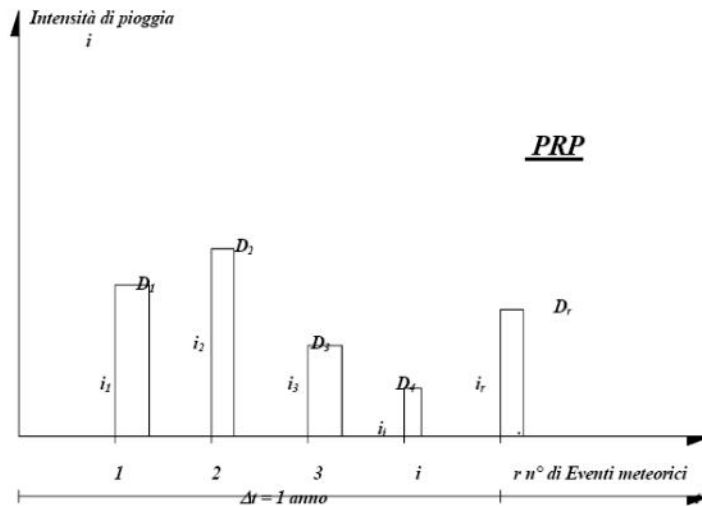


Figura 3.2: esempio di pluviogramma generato con un modello PRP

- Modelli Neyman-Scott White Noise (NSWN): sono modelli di tipo cluster, si differenziano da quelli poissoniani, in quanto l'occorrenza di un evento di precipitazione genera a sua volta l'arrivo di un certo numero di celle di pioggia, descritte da un impulso istantaneo. L'arrivo dell'evento segue una distribuzione di Poisson, per ogni evento viene descritto l'arrivo delle singole celle di pioggia, sia come numero, sia come intervallo di tempo dall'arrivo dell'evento. Le distribuzioni assegnate a questi due fenomeni generano le diverse versioni del modello. Una volta determinato il numero e la posizione temporale delle celle si assegna una distribuzione di probabilità alla v.a.  $H$  (altezza di pioggia), come nel caso dei modelli PWN.

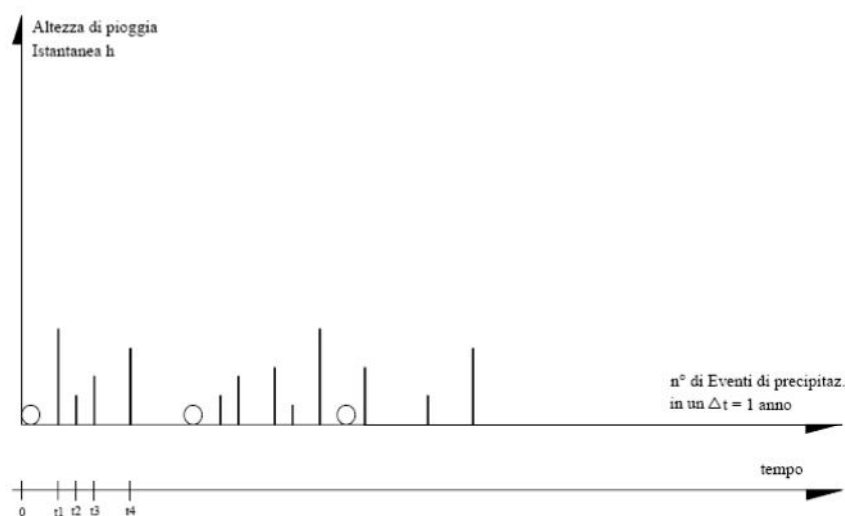


Figura 3.3: esempio di pluviogramma generato con un modello NSWN

- Modelli Neyman-Scott Rectangular Pulse (NSRP): questo tipo di modelli segue la logica dei NSWN, fatta eccezione per la descrizione della singola cella di pioggia, che viene schematizzata con l'approccio, già esposto per i modelli PRP, a impulso rettangolare. Le due classi principali individuabili per questo tipo di modelli adottano rispettivamente un processo di Neyman-Scott oppure un processo di Bartlett-Lewis (Roudriguez-Iturbe,1987) che si differenziano sostanzialmente per la diversa descrizione dell'arrivo delle celle di pioggia: per il primo modello ogni cella ha un arrivo indipendente e identicamente distribuito (con assegnata distribuzione), mentre per il secondo sono le distanze tra l'arrivo di due celle ad esserlo. Per la loro struttura questi modelli possono presentare due o più diversi impulsi rettangolari nello stesso istante temporale, è sufficiente che la durata di una cella sia minore del tempo intercorrente tra due celle successive, per questo motivo l'intensità totale all'istante generico  $t$  è data dalla somma delle intensità delle singole celle presenti. A differenza del Barlett-Lewis RP, la formulazione del modello Neyman-Scott RP consente la possibilità di avere la presenza di una cella di pioggia vicina all'origine dell'evento, in accordo con l'evidenza fisica del fenomeno.

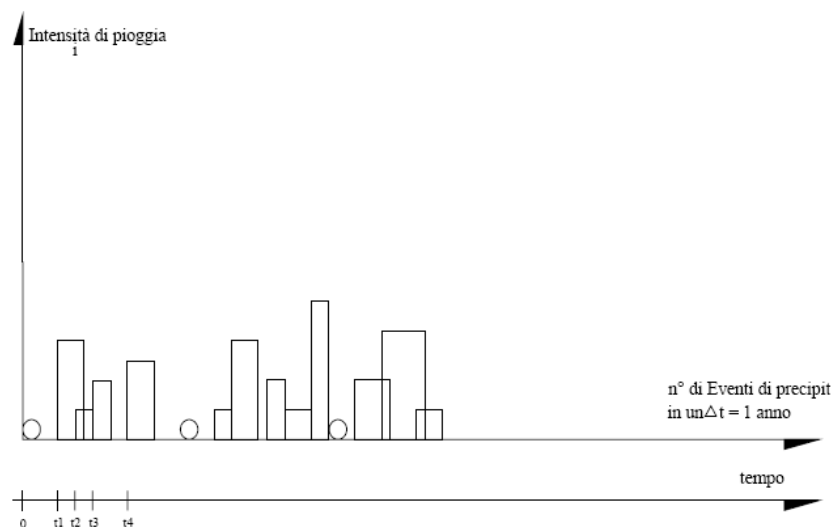


Figura 3.4: esempio di pluviogramma generato con un modello NSRP

Conclusa questa breve presentazione dei principali modelli a processi puntuali, nei paragrafi seguenti verrà approfondita la trattazione del modello Neyman-Scott Rectangular Pulse, che sarà successivamente utilizzato per la generazione di serie storiche sintetiche necessarie per lo studio delle vasche di prima pioggia.

### 3.3 Modello Neyman Scott Rectangular Pulses

Come introdotto in precedenza, nello studio dei fenomeni di precipitazione sono stati sviluppati nel tempo diversi modelli per la produzione sintetica di serie storiche di precipitazione. Tra questi, uno dei più avanzati attualmente disponibili è il modello stocastico a processi puntuali di tipo cluster detto Neyman-Scott Rectangular Pulse, NSRP (Cowpertwait et al., 1994, 1995). Come esposto nei capitoli precedenti la classe di modelli, cui l'NSRP appartiene, incorpora nella sua struttura aspetti fisici, che vengono descritti con assegnate distribuzioni marginali di probabilità. Di seguito verranno esposte in modo esteso le varie componenti di questo modello (Rodriguez-Iturbe et al., 1987; Cowpertwait et al., 1994, 1995).

La prima caratteristica è l'occorrenza dell'evento meteorico, assimilabile nella realtà con l'arrivo di un fronte atmosferico, descritta da un processo poissoniano di parametro  $\lambda$  ( $h^{-1}$ ) che rappresenta il tasso di occorrenza di un evento, il suo inverso fornisce il tempo medio intercorrente tra due eventi del periodo considerato. La variabile aleatoria  $s$  descrive il numero di perturbazioni in un certo intervallo di tempo è quindi distribuita come segue.

$$p_S(s) = \frac{(\lambda \Delta t)^s}{s!} e^{-\lambda \Delta t} \quad (3.1)$$

Ogni evento dà luogo a un secondo processo di arrivi, che determina il numero di celle di pioggia. Tale processo è descritto da due grandezze, in primo luogo il numero di celle  $c$  associate all'evento, per completare la descrizione è necessario anche l'intervallo di tempo tra l'arrivo dell'evento e l'arrivo della singola cella. Per il primo parametro sono presenti in letteratura casi in cui si considera il numero di celle distribuito con legge geometrica (Cowpertwait et al., 1994), in altri casi invece viene assunto con distribuzione poissoniana di parametro  $\nu$ .

$$p_C(c) = \frac{(\nu_{c-1})^{c-1}}{(c-1)!} e^{-\nu_{c-1}} \quad (3.2)$$

dove  $c - 1$  è imposto per garantire almeno una cella di pioggia per ogni evento di precipitazione (Cowpertwait et al., 1996).

L'intervallo di tempo tra l'inizio dell'evento e la singola cella è invece distribuito con legge esponenziale di parametro  $\beta$  ( $h^{-1}$ ), il suo inverso rappresenta il tempo medio di attesa tra un evento e una cella ad esso associata.

$$p_W(w) = \beta e^{-\beta w} \quad (3.3)$$

Una volta descritto il processo di doppio arrivo, restano da definire le caratteristiche delle singole celle di pioggia. Come detto in precedenza le due dimensioni degli impulsi rettangolari sono costituite dall'intensità  $I$  e dalla durata  $D$ , descritte entrambe da una legge esponenziale di parametri rispettivamente  $\eta$  ( $h^{-1}$ ) e  $\xi$  ( $h/mm$ ), i cui inversi rappresentano rispettivamente la durata media di una cella e l'intensità media di una cella.

$$p_I(i) = \eta e^{-\eta i} \quad (3.4)$$

$$p_D(d) = \xi e^{-\xi d} \quad (3.5)$$

Infine, per determinare l'intensità di pioggia a ogni istante temporale, si sommano le intensità delle singole celle attive in quell'istante.

$$Y(t) = \int_{u=0}^{\infty} I_{t-u}(u) dN(t-u) \quad (3.6)$$

Dove  $dN(t-u)$  assume valore  $I$  se nell'intervallo  $t-u$  esiste almeno una cella di pioggia,  $0$  in caso contrario, mentre l'intensità è regolata come segue.

$$I_{t-u}(u) = \begin{cases} I & \text{con probabilità } e^{-\eta u} \\ 0 & \text{con probabilità } 1 - e^{-\eta u} \end{cases} \quad (3.7)$$

Una rappresentazione grafica del modello descritto è riportata in figura 3.5 e mostra il procedimento di generazione della serie storica. In primo luogo viene generato l'arrivo degli eventi meteorici (Figura 3.5a). Da ogni evento meteorico sono poi generati i secondi arrivi, delle celle di pioggia, sia in termini di numero sia in termini di distanza temporale dall'evento (Figura 3.5b). Per ogni cella vengono generate intensità e durata, a partire dalle distribuzioni marginali esposte in precedenza (Figura 3.5c). Infine, per ogni istante temporale, sono sommate le intensità delle celle attive per ottenere l'intensità complessiva (Figura 3.5d), ottenendo così la serie di pioggia sintetica.

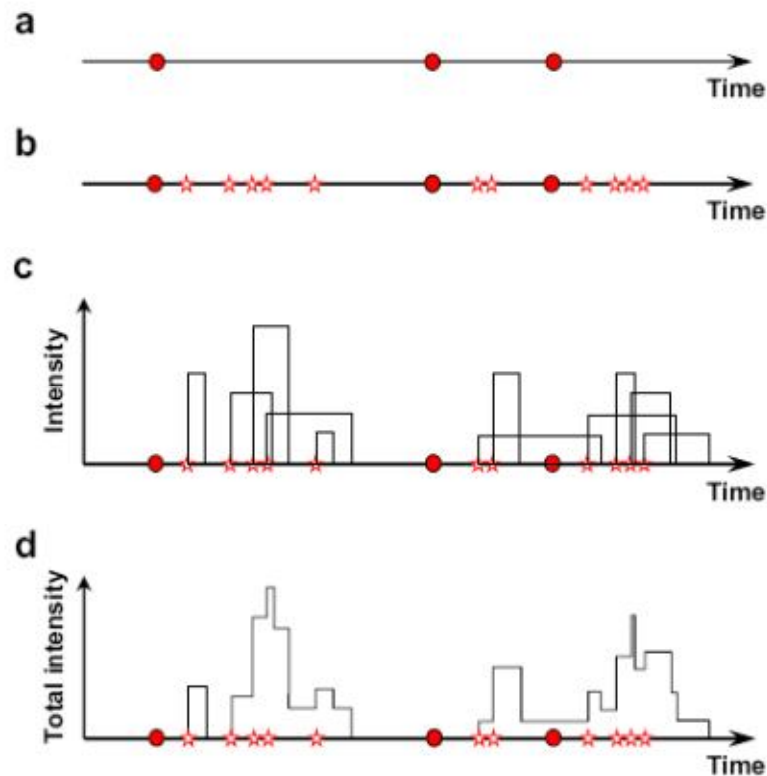


Figura 3.5: schema concettuale del modello Neyman-Scott Rectangular Pulse (A.Burton et al., 2008).

Questo modello si basa quindi sull'attribuzione di distribuzioni di probabilità ai parametri fisici che descrivono il fenomeno di precipitazione. I parametri sono cinque:  $\lambda, \nu, \beta, \eta$  e  $\xi$ , che dovranno essere stimati.

Esistono poi delle evoluzioni del modello (Generalised NSRP o GNSRP), che vanno a distinguere il tipo di celle in convettive, caratterizzate da breve durata e alta intensità, e stratiformi, che presentano al contrario durate più lunghe e intensità minori. Questo aspetto è tradotto nel modello assegnando una probabilità  $\alpha$  all'occorrenza di un tipo di cella, e  $1 - \alpha$  all'altra, con una stima dei parametri che descrivono la cella ( $\eta$  e  $\xi$ ) diversa a seconda del tipo (Cowpertwait e O'Connel, 1997).

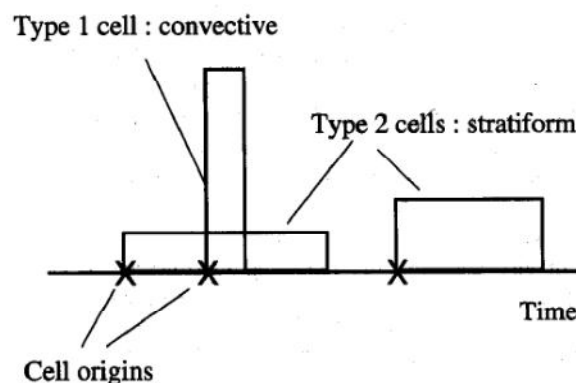


Figura 3.6: esempio grafico di celle convettive o stratiformi (Cowpertwait e O'Connel, 1997).

Infine sono presenti in letteratura studi atti a regionalizzare questo modello, per avere una stima distribuita del campo di pioggia (Burton et al., 2004). In questo caso subentrano la forma delle celle di pioggia e la loro posizione nello spazio. Nell'approccio proposto da Burton et al., (2004), le celle sono di forma circolare, con dimensione del raggio distribuita con una legge esponenziale, mentre la posizione nello spazio è una v.a descritta da un processo di Poisson. Come nel caso *single-site*, le celle mantengono la loro intensità costante nello spazio durante tutta la loro durata.

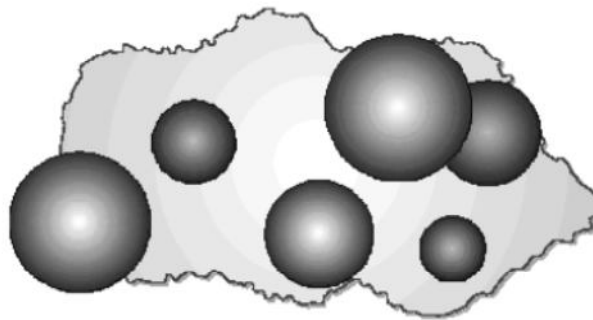


Figura 3.7: esempio di distribuzione delle celle di pioggia in un bacino ad un determinato istante temporale (Burton et al., 2004).

Per questo lavoro verrà considerato il modello a cinque parametri sopradescritto, applicato a un singolo sito. Nei paragrafi successivi si vedrà il metodo di stima dei parametri, in vista dell'applicazione del modello a un caso reale di Milano.

### 3.4 Stima dei parametri del modello

Una volta individuato il modello di riferimento per la descrizione del fenomeno precipitativo, è necessario operare una stima dei parametri che lo descrivono. Nel caso di modello NSRP si è visto come i parametri che lo rappresentano siano rispettivamente  $\lambda, \nu, \beta, \eta$  e  $\xi$ , introdotti in precedenza. La formulazione del modello considera le caratteristiche del fenomeno di precipitazione costanti nel tempo, risulta quindi necessario stimare i parametri per i vari periodi dell'anno, se si opera a scala mensile il numero di parametri da stimare sarà quindi  $12 \times 5$ . In letteratura sono presenti diversi esempi di metodi per la calibrazione del modello. In alcuni casi viene preso in considerazione il carattere fluttuante del processo di precipitazione, andando a stimare il periodo dopo il quale la varianza dell'intensità assume valori stabili, per ricavare una funzione di *scale fluctuation* (Vanmarcke, 1983), utilizzata nella stima dei parametri. In

altri casi è stata presa in considerazione la stagionalità del regime pluviometrico. Partendo da questo assunto, è possibile ipotizzare che anche i parametri del modello varino di mese in mese secondo un'armonica. A questo punto è sufficiente determinare i tre parametri dell'armonica (intercetta, ampiezza e fase), per stimare il parametro ogni mese dell'anno (Cowpertwait, 1994), in questo modo si riduce il numero di parametri da stimare da  $12 \times 5$  a  $3 \times 5$ .

Per questo lavoro si è deciso di operare la stima dei parametri con il tradizionale metodo dei momenti, (Rodriguez-Iturbe et al., 1987a,b; Entekhabi et al., 1989; Cowpertwait et al., 1991,1996a). Tale metodo si propone di realizzare la stima, eguagliando i momenti del modello stocastico ai corrispettivi momenti campionari, calcolati sulla base di dati disponibili. In particolare, per ottenere un sistema determinato, si dovranno utilizzare cinque momenti, per poter ricavare i parametri del modello. Al fine di ottenere il miglior fitting possibile, Cowpertwait et al. (1996a) hanno proposto come una stima con più di cinque momenti, operando una stima tramite la ricerca del minimo della seguente funzione obiettivo.

$$S = \sum_{i=0}^m w_i \left(1 - \frac{f_i}{\hat{f}_i}\right)^2 \quad (3.8)$$

Dove  $f_i$  rappresenta un generico momento del modello stocastico, mentre  $\hat{f}_i$  indica il corrispettivo momento campionario ricavato dai dati utilizzati.  $w_i$  infine è il peso dato al momento considerato. In questo modo si può decidere che la procedura di fitting vada a buon fine su alcuni momenti importanti (per le applicazioni del modello), come ad esempio la media dell'altezza di pioggia. La funzione ai minimi quadrati è nella forma di rapporto per evitare che valori elevati vadano a dominare la calibrazione (Cowpertwait et al., 1996a). Seguono le funzioni utilizzate per la stima dei parametri, sia del modello stocastico sia dei dati campionari.

Per questo lavoro si è deciso di operare la stima dei parametri utilizzando cinque momenti.

### 3.4.1 Momenti del modello NSRP

La scelta dei momenti con cui eseguire operare la stima dei parametri dipende dal problema applicativo che si vuole studiare utilizzando l'NSRP. I momenti di primo e



secondo ordine sono stati derivati da Roudriguez-Iturbe (1987), e vengono utilizzati, ad esempio, nella stima per problemi di previsione del campo medio di pioggia. Per altre applicazioni, ad esempio problemi di stima dei valori estremi, è stata dimostrata l'importanza dell'impiego dei momenti di ordine maggiore, come la skewness (Cowpertwait, 1998), che in questo lavoro non sono stati presi in considerazione.

Passiamo ora a riportare i momenti utilizzati per questo lavoro: in primo luogo vengono considerati il valore atteso e la varianza (Rodriguez-Iturbe, 1987), la notazione è la stessa utilizzata nell'esposizione del modello, mentre  $h$  è l'aggregazione temporale considerata in ore.

$$E\left(Y_i^{(h)}\right) = \frac{h\lambda v}{\eta\xi} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} Var\left(Y_i^{(h)}\right) = & \frac{\lambda}{\eta^3} (h\eta - 1 + e^{-h\eta}) \left[ 2v \frac{2}{\xi} + (v^2 - 1) \frac{\beta^2}{\xi^2} \frac{1}{(\beta^2 - \eta^2)} \right] + \\ & - \lambda (h\beta - 1 + e^{-h\beta}) (v^2 - 1) \frac{1}{\beta\xi^2} \frac{1}{(\beta^2 - \eta^2)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Oltre ai primi due momenti, è stata derivata anche la covarianza, nel caso di applicazione a problemi multi-sito, questa viene calcolata con le serie di dati pluviometrici delle diverse stazioni disponibili. Nel caso in esame invece, trattandosi di un'applicazione single-site, la covarianza viene calcolata sulla stessa serie di dati, presa due volte con un certo tempo di ritardo (o di lag), si sfasa l'inizio di una serie di un certo tempo (indicato con  $k$ , in ore) rispetto all'altra, e si calcola la covarianza che in questo caso prende il nome di autocovarianza (Cowpertwait et al., 1996a). La seguente relazione è valida per  $k \geq 1$ .

$$\begin{aligned} Cov\left(Y_i^{(h)}; Y_{i+k}^{(h)}\right) = & \frac{\lambda}{\eta^3} (1 - e^{-h\eta})^2 e^{-h(k-1)\eta} \left[ v \frac{2}{\xi} + \frac{1}{2} (v^2 - 1) \frac{\beta^2}{\xi^2} \frac{1}{(\beta^2 - \eta^2)} \right] \\ & - \lambda (1 - e^{-h\beta}) e^{-h(k-1)\beta} (v^2 - 1) \frac{1}{\xi^2} \frac{1}{2\beta(\beta^2 - \eta^2)} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Un ulteriore parametro derivabile per il modello NSRP è la correlazione: come per la varianza, trattandosi di una applicazione single-site, si parla in questo caso di autocorrelazione. La formulazione generale della correlazione tra due serie di dati è data dal rapporto tra la covarianza e la radice del prodotto delle varianze delle singole serie

di dati. In questo caso, trattandosi della stessa serie di dati sfasata di un tempo  $k$ , la varianza delle due serie di dati coincide, e l'autocorrelazione prende la seguente formulazione.

$$\text{Corr} \left( Y_i^{(h)}; Y_{i+k}^{(h)} \right) = \text{Cov} \left( Y_i^{(h)}; Y_{i+k}^{(h)} \right) / \text{Var} \left( Y_i^{(h)} \right) \quad (3.12)$$

Per ora si hanno a disposizione quattro relazioni per la stima dei parametri. Un'ultima proprietà per completare il set di funzioni è la probabilità di avere un intervallo di lunghezza  $h$ , pari al passo di campionamento dei dati disponibili, senza precipitazione (Cowpertwait, 1991).

$$\begin{aligned} \text{Pr} \left\{ Y_i^{(h)} = 0 \right\} = \Phi(h) = \exp \left( -\lambda h + \frac{\lambda}{\beta(v-1)} \left\{ 1 - \exp \left[ 1 - v + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + v - 1 e^{-h\beta} - \lambda \int_0^h (1 - p_h(t)) dt \right] \right\} \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Dove il termine  $p_h(t)$  è dato dalla seguente formulazione:

$$\begin{aligned} p_h(t) = \left\{ e^{-(h+t)\beta} + 1 - (\eta e^{-t\beta} - \beta e^{-t\eta}) / (\eta - \beta) \right\} \\ \exp \left\{ -(v-1)\beta(e^{-t\beta} - e^{-t\eta}) \frac{1}{(\eta-\beta)} - (v-1)e^{-t\beta} + \right. \\ \left. + v - 1 e^{-(h+t)\beta} \right\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

L'integrale descritto dalla (3.13) risulta di difficile soluzione analitica, come è evidente osservando la (3.14), per questo motivo si è operata una valutazione numerica di tale variabile.

### 3.4.2 Momenti campionari

Una volta esposti i momenti della distribuzione di probabilità del modello utilizzato, vengono esposti gli stimatori campionari, calcolati sulla base di dati disponibili.

La media campionaria e la varianza campionaria seguono la formulazione classica della statistica descrittiva.

$$m = \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n Y_i \quad (3.15)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (3.16)$$

Dove  $Y_i$  rappresenta l' $i$ -esimo valore della serie di dati disponibile.

La covarianza, come già accennato, viene in questo caso calcolata su due serie provenienti dallo stesso campione, con istante di inizio sfasato di un tempo di lag pari a un'ora. La formulazione dell'autocovarianza campionaria è la seguente.

$$\sigma_{Y_i Y_{i+k}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (Y_{j,i} - \bar{Y})(Y_{j+k,i} - \bar{Y}) \quad (3.17)$$

Nella (3.17)  $Y_{j,i}$  indica l' $i$ -esimo valore della serie di dati che ha inizio nell'istante  $j$  in cui ha inizio della serie, mentre  $Y_{j+k,i}$  è l' $i$ -esimo valore della serie con inizio nell'istante  $j+k$ , con  $k$  che rappresenta il tempo di lag (per questo lavoro si è posto pari a 1 h).

La funzione di autocorrelazione viene ricavata come già esposto in precedenza, e assume per le stime campionarie la seguente formulazione.

$$\rho_{Y_i Y_{i+k}} = \sigma_{Y_i Y_{i+k}} / S^2 \quad (3.18)$$

Per completare il set di funzioni per la stima dei parametri manca ora solo la probabilità di tempo secco. La stima è operata ricavando la frequenza di dati con valore non nullo ( $N_w$ ) rispetto al numero di dati totali ( $N_{tot}$ ).

$$\hat{\Phi}(h) = N_w / N_{tot} \quad (3.19)$$

Sono ora disponibili tutti i momenti necessari per la stima dei parametri, nel prossimo capitolo (Capitolo 4) verranno esposte le scelte di calcolo operate durante la procedura di fitting, e i risultati ottenuti.

### 3.5 Generazione di una serie storica sintetica

Una volta stimati i parametri del modello, sono disponibili le distribuzioni che caratterizzano il modello NSRP. In generale, per poter impiegare nella pratica una

qualsiasi distribuzione di probabilità, è necessario invertire la distribuzione cumulata (cdf), ad esempio  $F_X(x)$ , allo scopo di ottenere la variabile aleatoria  $x$ . A tale scopo occorre generare un numero casuale compreso tra 0 e 1, con distribuzione uniforme  $F_U(u)$ . Generando un numero casuale si ricava la sua cdf, dalla distribuzione uniforme, e la si eguaglia poi alla cdf della v.a. che si vuole generare, sostituendola nell'equazione invertita (figura 4.5). Verranno esposti in seguito i casi particolari applicati al problema in esame, e la procedura per generare una serie storica sintetica.

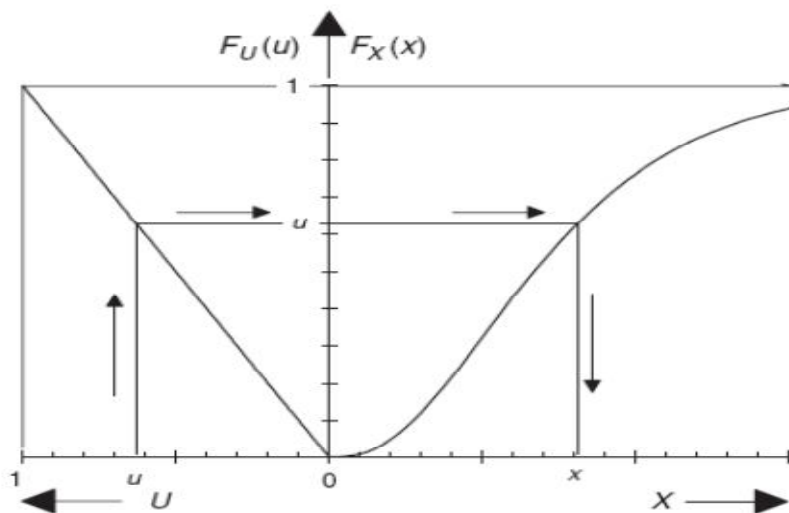


Figura 3.8: schema grafico dell'implementazione di una distribuzione di probabilità (Kottegoda e Rosso, 2008)

### 3.5.1 Applicazione del modello NSRP

Per prima cosa è necessario generare un numero  $s$  di eventi nell'intervallo di tempo preso in considerazione, nel nostro caso pari a un mese, utilizzando l'equazione (3.1). Il procedimento per l'inversione della cdf è il seguente. Si definisce la funzione di probabilità cumulata.

$$F_S(s) = P[S \leq s] = \sum_{i=0}^s p_S(i) = \sum_{i=0}^s \frac{(\lambda \Delta t)^i}{i!} e^{-\lambda \Delta t} \quad (3.20)$$

Da cui si può dedurre.

$$\sum_{i=0}^s p_S(i) = \sum_{i=0}^{s-1} p_S(i) + p_S(s) \quad (3.21)$$

Ora, sviluppando i calcoli e tenendo conto della (3.20), è possibile ricavare la  $p_S(s)$ , da cui si estrarrà il numero di eventi  $s$ .

$$\begin{aligned}
p_S(s) &= \sum_{i=0}^s p_S(i) - \sum_{i=0}^{s-1} p_S(i) = \\
&= [F_S(s) - F_S(s-1)] = \frac{(\lambda\Delta t)^s}{s!} e^{-\lambda\Delta t}
\end{aligned} \tag{3.22}$$

La (3.22) risulta implicita nella variabile  $s$  e deve quindi essere risolta per tentativi, inoltre, per ricavare il numero di eventi nel periodo in esame, è necessario generare due numeri casuali compresi tra 0 e 1.

Una volta determinato il numero di eventi, è necessario riprodurre il secondo processo di arrivi: quello relativo alle celle di pioggia, trattandosi della medesima distribuzione, la procedura è la stessa, si utilizza la relazione (3.2). Deve essere applicata per ognuno degli  $s$  eventi generati in precedenza. In questo caso si utilizza la seguente relazione.

$$\frac{(v_{c-1})^{c-1}}{(c-1)!} e^{v_{c-1}} - [F_C(c) - F_C(c-1)] = 0 \tag{3.23}$$

Per ogni cella di pioggia generata si devono poi delineare posizione temporale, durata e intensità. Come esposto nei capitoli precedenti (3.3), queste caratteristiche sono descritte da leggi esponenziali, che dovranno essere trattate come nel caso precedente (Poissoniane). Si riporta di seguito il procedimento applicato alla v.a. che descrive l'intervallo di tempo tra inizio evento e inizio cella, che viene poi applicato analogamente alle altre distribuzioni. Si definisce anche in questo caso la cdf.

$$F_W(w) = 1 - e^{-\beta w} \tag{3.24}$$

Dalla quale in questo caso è possibile ricavare il valore di  $w$  per via analitica.

$$1 - F_W(w) = e^{-\beta w} \tag{3.25}$$

$$-\ln[1 - F_W(w)] = \ln\left[\frac{1}{1 - F_W(w)}\right] = \beta w \tag{3.26}$$

$$w = \frac{1}{\beta} \ln\left[\frac{1}{1 - F_W(w)}\right] \tag{3.27}$$

La (3.27), a differenza dei casi precedenti, può essere calcolata direttamente, con la necessità di generare un solo numero casuale compreso tra 0 e 1 e rappresenta il tempo intercorrente tra l'inizio dell'evento e la cella di pioggia. Di seguito sono riportate le equazioni ricavate analogamente per le altre caratteristiche. Rispettivamente la (4.9) e la (4.10) indicano l'intensità della singola cella e la sua durata.

$$i = \frac{1}{\eta} \ln \left[ \frac{1}{1-F_I(i)} \right] \quad (3.28)$$

$$d = \frac{1}{\xi} \ln \left[ \frac{1}{1-F_D(d)} \right] \quad (3.29)$$

Una volta generate tutte le componenti del campo di pioggia, non resta che sommare le intensità delle celle attive in ogni istante temporale del periodo in esame.

Per questo lavoro è stato utilizzato il software in RainSim V.3.1.1 (Burton et al., 2008), sviluppato alla School of Civil Engineering and Geosciences della Newcastle University (UK). Tale programma implementa il modello NSRP con la possibilità di applicazioni sia multi sito, sia single-site. Il programma opera in tre sezioni principali (figura 3.9):

1. La prima opera l'analisi delle serie di dati, richiede come input una serie storica, a un determinato passo temporale (minimo 1 h), mentre in output fornisce le statistiche richieste per il fitting dei parametri.
2. La seconda sezione invece opera il fitting delle statistiche calcolate al passo precedente con quelle stimate con un set di parametri del modello, implementando un algoritmo di ottimizzazione che fornisce in output i migliori parametri ottenuti.
3. Infine la terza parte è quella dedicata alla simulazione della serie storica sulla base dei parametri stimati in precedenza, implementando un metodo analogo a quello descritto in precedenza.

Tutte le fasi sopra descritte possono essere applicate sia a un caso multi sito sia a una single site. La stima dei parametri richiede serie temporali con passo di campionamento minimo pari all'ora, mentre per il nostro lavoro si vuole operare la stima con il dato 5 minuti, più adatto a riprodurre il campo di pioggia di brevissima durata necessario per gli scopi di questo lavoro, la calibrazione verrà dunque eseguita implementando algoritmi di ottimizzazione.

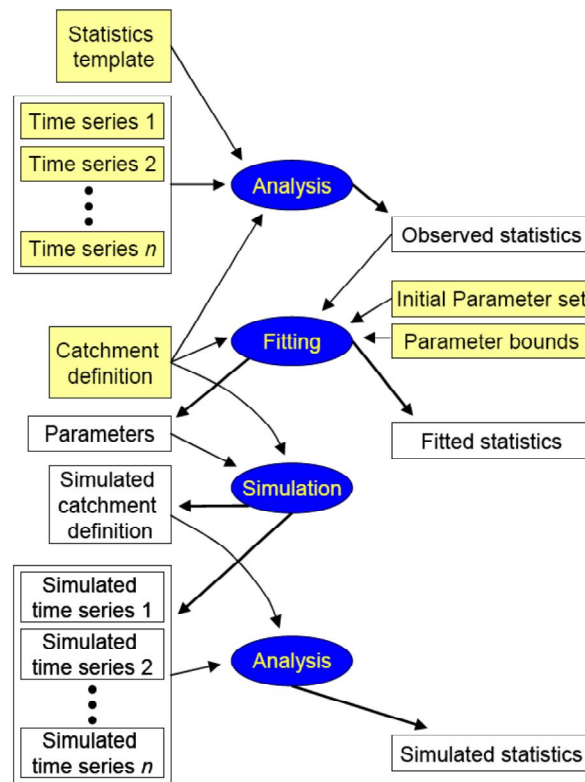


Figura 3.9: schema delle principali fasi dell'utilizzo del programma. in blu sono riportate le operazioni eseguite dal software, nei rettangoli input e output, in giallo i file che normalmente devono essere inseriti dall'operatore, mentre in bianco quelli creati, (Burton, 2008).

### 3.6 Conclusioni

In questo capitolo sono state brevemente introdotte le tecniche di riproduzione stocastica del campo di pioggia in un determinato sito. Per le nostre applicazioni si è deciso di adottare il modello NSRP, del quale abbiamo esposto la formulazione e i metodi di calibrazione più comuni in letteratura.

Si è poi descritta la metodologia di applicazione dei modelli stocastici, con i metodi pratici per utilizzare le distribuzioni di probabilità del modello. Infine è stata brevemente delineata la struttura del software RainSim V.3, utilizzato in parte per questo lavoro.

Nel prossimo capitolo verranno applicati i modelli e le procedure esposte, con la stima dei momenti campionari, la procedura di fitting e la generazione di una serie sintetica di pioggia, che verrà testata e validata.

## Capitolo 4:

# CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO

## 4.1 Dati

Il punto di partenza per la calibrazione del modello NSRP è una base di dati di pioggia che riproduca adeguatamente le statistiche rappresentative del regime pluviometrico locale, utilizzate poi nella funzione obiettivo, implementata per la stima dei parametri (equazione 3.8). Questo paragrafo descriverà in maniera dettagliata provenienza e natura della serie storica, a partire dall'1 gennaio 1971 al 31 dicembre 1991, relativa al pluviografo di Milano via Monviso, utilizzata per questo lavoro.

### 4.1.1 Strumento di misura

Lo strumento di misura della stazione in esame è un pluviografo a vaschette basculanti (modello SIAP UM8150, figura 4.1), con registrazione analogica. Il rilevatore è costituito da una vaschetta cilindrica che intercetta l'acqua precipitata e la convoglia all'interno dello strumento. La precipitazione si riversa in una delle due vaschette sino a riempirla, provocando l'instabilità del sistema, portando di conseguenza la seconda vaschetta in posizione per essere riempita. Questa operazione è detta basculata, e viene registrata, tramite un sistema analogico, da un pennino che scrive sopra un rotolo di carta montato su un tamburo rotante (figura 4.1, destra). Ogni basculata corrisponde a una quantità nota di altezza di pioggia (in questo caso è 0.2 mm di precipitazione), mentre il tamburo, ruotando a velocità nota, tiene conto dell'evoluzione temporale della registrazione. L'informazione viene in questo modo archiviata su "strisce" di carta, che devono essere quindi sostituite periodicamente.





Figura 4.1: a destra l'apparato di registrazione di un pluviografo analogico (SIAP UM8150), a sinistra esempio di un pluviometro a vaschette.

#### 4.1.2 Digitalizzazione dei dati

Lo strumento restituisce una serie di “strisce”, nelle quali è registrata l'informazione, sotto forma di altezza di pioggia. Per un utilizzo pratico di questi dati è necessaria la loro conversione in forma digitale (Piga et al., 1990). La digitalizzazione è stata realizzata prendendo il valore dell'altezza cumulata in un certo intervallo di tempo e dividendo per la durata. Il dato così ottenuto è moltiplicato per un fattore di scala, in modo da ottenere serie a intensità oraria (mm/h), calcolata su 5 minuti di misurazione. Le serie sono state digitalizzate in modo discontinuo, all'occorrenza di un evento. La definizione di evento di pioggia non è univoca, per esempio, in alcuni lavori, (Arrigoni e Villa 2009, Franzetti e Mambretti, 2008) due eventi sono considerati distinti se separati da almeno 96 ore (4 giorni) di intervallo secco, a causa della prescrizione relativa alle vasche di prima pioggia presente nella normativa della regione Lombardia. Nella digitalizzazione è stato invece considerato evento l'occorrenza di due basculate, corrispondenti a 0.4 mm di precipitazione, che non distino tra di loro più di un'ora. L'inter evento minimo corrisponde quindi a 60 minuti, se una basculata dista dalla precedente o dalla successiva per un tempo superiore a un ora, essa non viene presa in considerazione.

I dati ricavati in questo modo vengono memorizzati su un supporto informatico in formato .RED (figura 4.2): file di testo con tre righe di intestazione, dove vengono registrate data e ora di inizio dell'evento, altezza totale, scansione temporale in secondi e fattore di riduzione areale. Ogni riga ha inoltre un numero identificativo che ne descrive il contenuto: il 22 si riferisce a righe contenenti informazioni a corredo della serie, il 23 denota righe con dato di pioggia mentre il 33 indica la riga di chiusura del file. Il nome di

ogni file è costituito da otto cifre, riferite all'istante di registrazione della serie: le prime due indicano l'anno, le seconde due il mese, la terza coppia il giorno mentre l'ultima è riferita all'ora di avvio della registrazione.

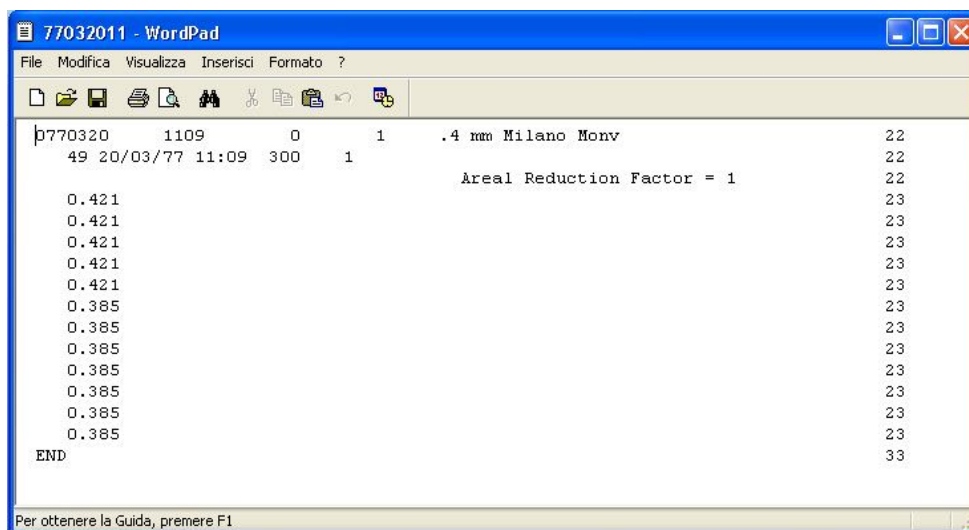


Figura 4.2: esempio di file registrato dal pluviometro di Milano Monviso.

#### 4.1.3 Ricostruzione della serie storica

La base di dati utilizzata per la stima dei momenti di interesse, comprende le registrazioni dal primo gennaio 1971 al 31 dicembre 1991, per un totale di 2923 serie di dati (file .RED). Di seguito sono riportati dei grafici che riassumono i dati estratti dalle registrazioni: in figura 4.3 sono indicate le altezze mensili medie degli anni di registrazione, si nota come le altezze massime si abbiano in primavera e autunno, a conferma del regime pluviometrico tipico della Nord Italia (massimi in primavera e autunno e minimi nei mesi estivi e invernali).

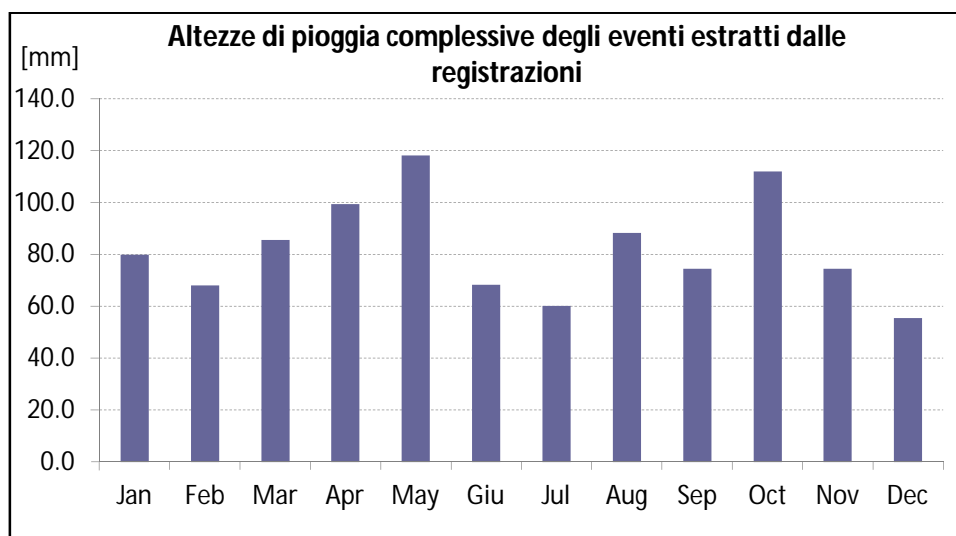


Figura 4.3: altezze di pioggia mensili mediate sui 20 anni di registrazioni.

Il secondo grafico (figura 4.4) mostra invece le altezze annuali registrate nel periodo in esame. L'altezza media è di circa un metro di pioggia (985.3 mm), con deviazione standard pari a 216.3 mm.

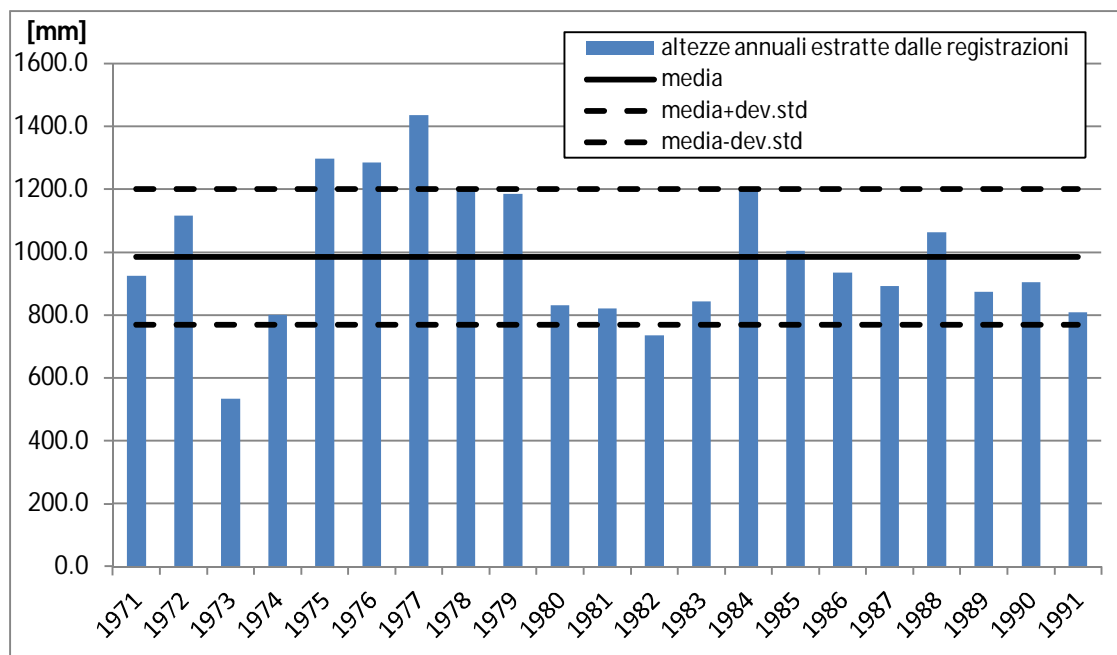


Figura 4.4: altezze totali annuali dei 20 anni di registrazione.

I file relativi alle registrazioni sono stati creati in base all'occorrenza di un evento, e presentano quindi un carattere discontinuo nel tempo. Nella calibrazione del modello NSRP è necessaria, tra le altre, la probabilità di periodo secco, è stato quindi necessario unire i dati in modo da avere una serie continua lungo tutto il periodo in esame.

Tabella 4.1: statistiche campionarie utilizzate per la calibrazione del modello.

	Media [mm]	Varianza [mm <sup>2</sup> ]	Autocovarianza [mm <sup>2</sup> ]	Autocorrelazione [-]	Prob. Dry [-]
<b>gennaio</b>	0.00890	0.00163	0.00120	0.73815	0.90508
<b>febbraio</b>	0.00842	0.00156	0.00104	0.66470	0.91586
<b>marzo</b>	0.00960	0.00235	0.00141	0.59758	0.92194
<b>aprile</b>	0.01138	0.00500	0.00157	0.31468	0.92152
<b>maggio</b>	0.01339	0.01161	0.00281	0.24161	0.92629
<b>giugno</b>	0.00792	0.01448	0.00106	0.07296	0.96597
<b>luglio</b>	0.00675	0.02030	0.00134	0.06669	0.98203
<b>agosto</b>	0.00989	0.02419	0.00360	0.14906	0.97288
<b>settembre</b>	0.00857	0.01173	0.00270	0.23010	0.96506
<b>ottobre</b>	0.01262	0.01089	0.00398	0.36436	0.93078
<b>novembre</b>	0.00858	0.00222	0.00124	0.71961	0.92219
<b>dicembre</b>	0.00625	0.00124	0.00086	0.69236	0.93536

Per questa operazione si è ipotizzato che, negli istanti temporali non contenuti nei file degli eventi, la precipitazione fosse nulla, mentre in realtà si ha solo la certezza che l'altezza di pioggia sia inferiore agli 0.2 mm, valore minimo per una basculata, questa approssimazione risulta comunque accettabile. In tabella 4.1 sono riportate le statistiche calcolate per ogni mese sulla serie di dati disponibile, per la calibrazione del modello sono necessarie le altezze di pioggia. Per ottenere questo dato, a scansione temporale di 5 minuti, è stata presa la serie storica contenente le intensità e divisa per un fattore 12 in modo da ottenere i dati in mm.

## 4.2 Calibrazione del modello

La calibrazione del modello ha lo scopo di stimare i cinque parametri che lo caratterizzano per ogni mese dell'anno, per un totale di 60 parametri. Dato il significato fisico ricoperto dagli elementi del modello nella procedura di fitting, sono stati imposti dei limiti ai valori, riportati in tabella 4.2, per mantenere i risultati entro grandezze plausibili. In letteratura l'entità dei limiti non è univoca, per questo lavoro si è deciso di utilizzare i valori implementati nel software RainSim V.3 (Burton et al., 2008).

Tabella 4.2: limiti dei parametri del modello NSRP (Burton, 2008).

Parametro	Limite inferiore	Limite superiore
$\lambda$	0.001	0.05
$\beta$	0.02	0.5
$\nu$	1	30
$\eta$	0.1	12
$\xi$	0.01	4

Di seguito si illustrano le diverse metodologie adottate per tale stima. Come si può notare dalla tabella 4.1 i momenti utilizzati hanno differenze tra loro di oltre un ordine di grandezza, per questo motivo è stata utilizzata la relazione (3.8) invece della somma delle differenze al quadrato, in modo da attribuire lo stesso peso a tutti i momenti.

### 4.2.1 Calibrazione con foglio di calcolo

Il primo passo per la calibrazione sta nell'implementare, in un foglio di calcolo (Excel), le equazioni che descrivono il problema, i parametri del modello sono stati ipotizzati di

tentativo e, con l'aiuto del risolutore, ricercare il minimo della funzione obiettivo. Tale soluzione si è dimostrata immediatamente inefficace, data la difficoltà incontrata dagli algoritmi implementati nel foglio Excel<sup>1</sup> nel raggiungere il minimo globale, rimanendo spesso con soluzione circoscritta a minimi locali. La causa di questo problema viene messa in evidenza analizzando l'andamento della funzione obiettivo (figura 4.3).

Per ottenere una visualizzazione corretta della funzione obiettivo, sarebbe necessario riprodurre un grafico in sei dimensioni (cinque parametri e la funzione obiettivo), in modo da sondare tutte le possibili combinazioni dei parametri in gioco. Data l'impossibilità di una simile soluzione, si è deciso di operare una semplificazione: si è costruito un grafico in due variabili, ponendo in ordinata la funzione obiettivo mentre in ascissa uno dei cinque parametri, mantenendo costanti gli altri quattro. Il parametro con cui si riscontra meglio la complessità della funzione obiettivo è risultato essere  $\beta$ .

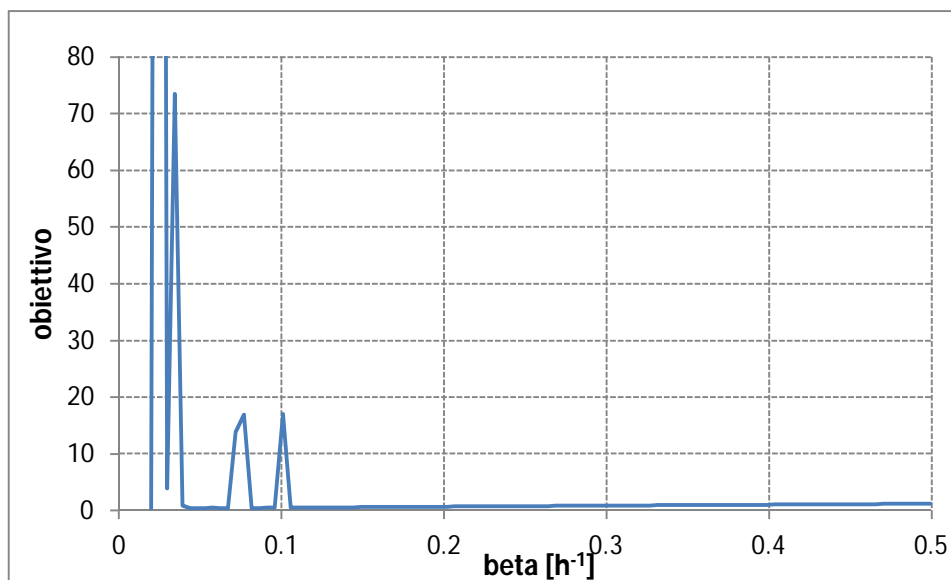


Figura 4.5: andamento della funzione obiettivo al variare del parametro  $\beta$ <sup>2</sup>.

La figura mette in evidenza come, al variare di un solo parametro, la funzione obiettivo presenti diversi minimi locali, e, per questo, la calibrazione del modello con il foglio di calcolo Excel per la ricerca del minimo globale non porta a risultati accettabili.

#### 4.2.2 Calibrazione con Calcolo Evolutivo

Data la natura della funzione obiettivo, che presenta molti minimi locali, si è pensato di implementare dei metodi che sondino in modo casuale l'intero spazio delle possibili

<sup>1</sup> Nella funzione "risolutore" del foglio di calcolo Excel sono implementati metodi deterministici quali il metodo del gradiente e il metodo di Newton.

<sup>2</sup> Il grafico risulta troncato sulla scala verticale, questo è dovuto alla presenza di pochi valori che risultano maggiori di diversi ordini di grandezza e renderebbero illeggibile il grafico.

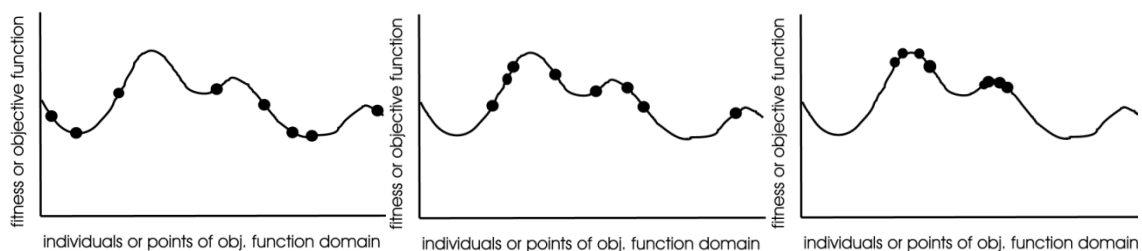
soluzioni. Una soluzione potrebbe essere investigare tutte le possibili combinazioni dei parametri, facendo variare i loro valori con passo pari alla precisione desiderata nella stima. Tuttavia, un algoritmo strutturato in questo modo, sarebbe troppo oneroso in termini di calcolo, basti pensare che, per ottenere parametri con quattro cifre significative, ci vorrebbe un numero totale di iterazioni dell'algoritmo pari a circa  $10^{12}$ .

Per la calibrazione si è quindi scelto di utilizzare alcune tecniche di calcolo evolutivo, che generano in modo casuale soluzioni, valutandone successivamente la bontà.

Il calcolo evolutivo si basa sull'analogia con la teoria dell'evoluzionismo: come un individuo di una popolazione ha più possibilità di sopravvivere e riprodursi se è ben adattato all'ambiente circostante, allo stesso modo una soluzione può sopravvivere se risolve il problema cui è riferita meglio delle altre. Il grado di adattamento di una soluzione al suo problema è valutato tramite una funzione obiettivo, che può essere considerato come il grado di adattamento (o fitness) di un individuo nel suo habitat.

L'evoluzione della specie attraverso la selezione naturale viene quindi riprodotta nel calcolo evolutivo, facendo "sopravvivere" le migliori soluzioni, in modo che possano generare nuove popolazioni migliori, evolvendo in questo modo verso soluzioni che meglio rispondono al problema in esame.

Nella pratica le tecniche di calcolo evolutivo comprendono una serie di algoritmi di ottimizzazione, basati sulla generazione stocastica di soluzioni. La loro capacità di risolvere problemi fortemente non lineari, multimodali e discreti, li rendono preferibili a tecniche deterministiche che, come nel nostro caso, risultano parzialmente o totalmente inefficienti.



**Figura 4.6: tipico andamento di un algoritmo evolutivo di ottimizzazione, (Eiben e Smith, 2003).**

In figura 4.6 è riportato il tipico andamento delle iterazioni di un algoritmo evolutivo di ottimizzazione (in questo caso l'obiettivo è massimizzare la funzione), dalla quale si evince come, con questo tipo di tecniche, non si possa essere certi di raggiungere

esattamente il massimo (minimo) del fitness, ma nella famiglia di soluzioni finali si è abbastanza sicuri di ricadere nel suo bacino di attrazione.

Le componenti che caratterizzano un algoritmo evolutivo sono brevemente esposte in seguito (Eiben e Smith, 2003):

- Rappresentazione: ogni individuo di una popolazione è codificato con una stringa detta *cromosoma*, ogni cromosoma è costituito da elementi di codifica, chiamati *geni*, responsabili di una o più caratteristiche del cromosoma. Le diverse configurazioni che ogni gene può assumere sono dette *alleli*. Un set di geni (genotipo) si manifesta come fenotipo sotto forma di una possibile soluzione.
- Funzione obiettivo (o fitness): il ruolo di una funzione obiettivo è quello di rappresentare il grado di adattamento dell'individuo al suo ambiente. A seconda dei casi, il fitness migliore può essere un valore minimo o massimo di tale funzione.
- Popolazione: comprende tutti i genotipi, ed è l'unità di base dell'evoluzione, non sono infatti gli individui a variare, ma le successive popolazioni. La *diversità* di una popolazione indica il numero delle diverse soluzioni presenti. Come nella biologia, non necessariamente a una soluzione è legato un solo fenotipo (soluzione) e allo stesso modo un fenotipo non è connesso a un singolo genotipo.
- Selezione: serve per individuare gli individui con maggior fitness, e determinare quindi i genitori per le successive generazioni.
- Variazioni: intervengono nella generazione di popolazioni successive, con lo scopo di ampliare lo spazio di ricerca e migliorare il fitness delle soluzioni. Possono agire in due differenti modi: *ricombinando* parti di soluzioni con fitness più alto, con lo scopo di creare figli migliori dei genitori, prendendo parte dei geni da entrambi i genitori (*crossover*), oppure *mutando* casualmente parti delle soluzioni, per ampliare lo spazio investigato.
- Selezione o sopravvivenza: è un meccanismo simile alla selezione, che si applica in uno step differente dell'algoritmo, dopo la generazione di una popolazione successiva. Serve per valutare il fitness dei figli generati.
- Condizione di termine: per arrestare il calcolo, può essere di due tipi: per raggiunta qualità della popolazione generata, vale a dire il raggiungimento di un predeterminato valore della funzione obiettivo, oppure per raggiunti limiti di tempo di calcolo.

Nel nostro lavoro si sono implementate due tecniche di calcolo: gli Algoritmi Genetici (GA), e l'Evolutionary Programming (EP), esposti in modo più approfondito nel seguito.

### Algoritmi Genetici

Questo tipo di algoritmi è largamente utilizzato per la soluzione di problemi di ottimizzazione. Sono strutturati con lo stesso schema generale esposto in precedenza per gli algoritmi evolutivi, con entrambe le tecniche di ricombinazione implementate (crossover e mutazione). Di seguito è riportata l'interfaccia del programma sviluppato.

The screenshot shows a software window titled "Parametri" with a blue title bar and a close button. The interface is organized into several sections:

- Parametri fissi:** A grid of input fields for parameters h (0.0833), k (1.0), b (0.02), l (0.001), n (1), h (1), and x (0.01). There is a checkbox for "Penalizza fuori dai limiti" which is currently unchecked.
- Estremo inferiore / Estremo superiore:** A grid of input fields for parameters b (0.02), l (0.001), n (1), h (1), and x (0.01).
- Valore obiettivo:** A grid of output fields for Media (0.00856769), Varianza (0.011729343), Covarianza (0.002702617), Correlazione (0.230102952), and Tempo secco (0.965062831).
- Parametri della simulazione:** Input fields for "Numero degli individui" (100), "Numero delle generazioni" (1000), and "Percentuale di elitismo" (20). There is a checked checkbox for "Non calcolare se con problemi".
- Parametri migliori:** A grid of output fields for parameters b (0.00300), l (0.02900), n (8.00000), h (3.79500), and x (2.16500).
- Obiettivo stimato:** A grid of output fields for Media (0.00235), Varianza (0.00129), Covarianza (0.00109), Correlazione (0.84424), and Tempo secco (0.95171).
- Tipo di calcolo:** Radio buttons for "Un solo valore" (unchecked) and "Ricerca ottimo con GA" (checked).
- Other options:** A checked checkbox for "Scrivi file 'StoricoParametri.txt'", and a text label "Somma dei quadrati delle differenze" with the value 0.37745.
- Buttons:** Two large buttons at the bottom: "CALCOLA" and "Fine programma".

Figura 4.7: interfaccia del programma con algoritmo genetico, esempio con calcoli relativi al mese di settembre.

Dalla figura 4.7 è evidenziabile il numero di individui che compongono una popolazione, e il numero di generazioni del programma. Nell'interfaccia è possibile inserire i valori obiettivo delle statistiche utilizzate per la calibrazione, mentre in output il valore dei parametri corrispondenti alla miglior soluzione trovata.

Nonostante la potenza di quest'algoritmo le soluzioni trovate non sono risultate soddisfacenti. Se si vanno ad analizzare le statistiche stimate, confrontandole con quelle



obiettivo, si nota come, nell'esempio riportato, non risultino adeguate. Il motivo di questo inconveniente è spiegabile andando ad analizzare la routine di calcolo. In figura 4.8 sono riportati due grafici: il primo riferito alla miglior soluzione di ogni generazione, il secondo relativo al fitness medio lungo le iterazioni. Osservando sia la media sia il migliore, si nota come, dopo poche generazioni, le soluzioni si attestino a un valore costante. Questo comportamento è atteso in questi algoritmi, anche se la convergenza verso valori costanti (e ottimi) dovrebbe avvenire lungo la maggior parte delle iterazioni. In questo caso invece il valore costante si presenta appena iniziata la routine, dopo circa 20-30 iterazioni. Analizzando l'andamento della miglior soluzione, si nota anche come stranamente il valore obiettivo finale non sia il minimo trovato, ma un valore di poco superiore. Per questi motivi anche la calibrazione con algoritmi genetici non ha fornito risultati soddisfacenti.

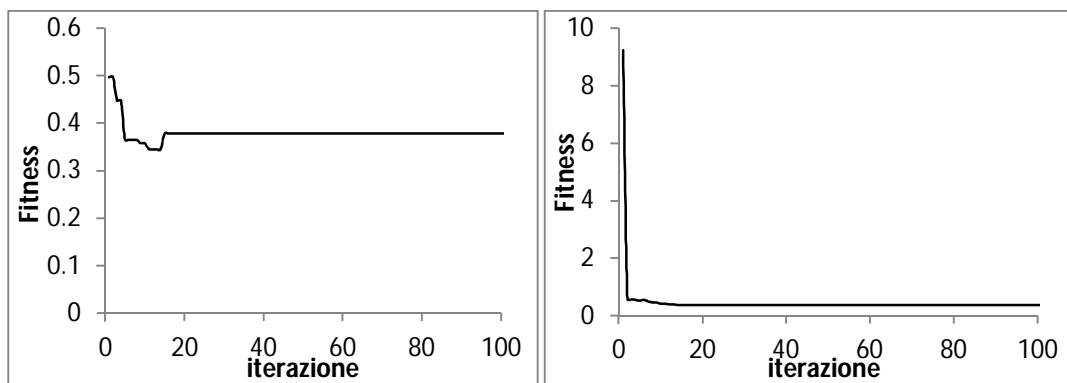


Figura 4.8: andamento della funzione obiettivo per ogni generazione, a destra il miglior individuo, a sinistra la media sulla popolazione della funzione.

### *Programmi Evolutivi*

Data l'inefficienza degli GA per risolvere il problema in esame, si è pensato di ricorrere a un'altra tecnica di calcolo evolutivo: la programmazione evolutiva. Pur rientrando nella famiglia degli algoritmi evolutivi, questo tipo di programmazione si distingue, per alcuni suoi aspetti, dal caso precedente. In particolare, la differenza maggiore risulta nella generazione dei figli degli individui di una popolazione. La riproduzione non prevede la ricombinazione dei geni degli individui con fitness migliore, ma solo una relazione padre figlio: ogni individuo di una popolazione non viene scartato se di scarso valore, ma da ognuno viene generato un figlio, tramite una mutazione guidata da una perturbazione gaussiana; se il figlio è migliore del padre viene mantenuto nella nuova generazione, altrimenti è il padre a rimanere.

La calibrazione con questo tipo di algoritmo è sembrata in un primo momento molto efficiente, come mostrato in figura 4.9, i risultati relativi ai primi mesi dell'anno hanno portato a stimare funzioni obiettivo dell'ordine del  $10^{-3}$ . La soluzione con miglior fitness ottenuta in output dal programma non è necessariamente il minimo globale, ma ricade comunque nel bacino di attrazione di quest'ultimo. Per questo motivo, con i parametri ottenuti dal programma, si è eseguito un run con il risolutore del foglio excel, per ricercare in modo deterministico il minimo locale, che in teoria avrebbe dovuto coincidere con il minimo globale.

Parametri fissi	Estremo inferiore	Estremo superiore	Valore obiettivo	
h: 0.0833	b: 0.02	0.5	Media	0.00890
k: 1.0	l: 0.001	0.05	Varianza	0.00163
<input checked="" type="checkbox"/> Penalizza fuori dai limiti	n: 1	30	Covarianza	0.00120
	h: 0.1	12	Correlazione	0.73815
	x: 0.01	4	Tempo secco	0.90508

Parametri della simulazione	Parametri migliori	Obiettivo stimato	
Numero degli individui: 200	b: 0.16429	Media	0.00930
Numero delle generazioni: 1000	l: 0.02081	Varianza	0.00161
<input checked="" type="checkbox"/> Non calcolare se con problemi	n: 21.60582	Covarianza	0.00120
	h: 7.27533	Correlazione	0.74663
	x: 0.55386	Tempo secco	0.91987

Tipo di calcolo:  
 Un solo valore  
 Ricerca ottimo con EP

differenze normalizzate al quadrato: 0.00252  
 Scrive file "StoricoParametri.txt" completo

CALCOLA      Fine programma

Figura 4.9 interfaccia dell'algoritmo con programmazione evolutiva (EP), esempio con calcoli relativi al mese di gennaio.

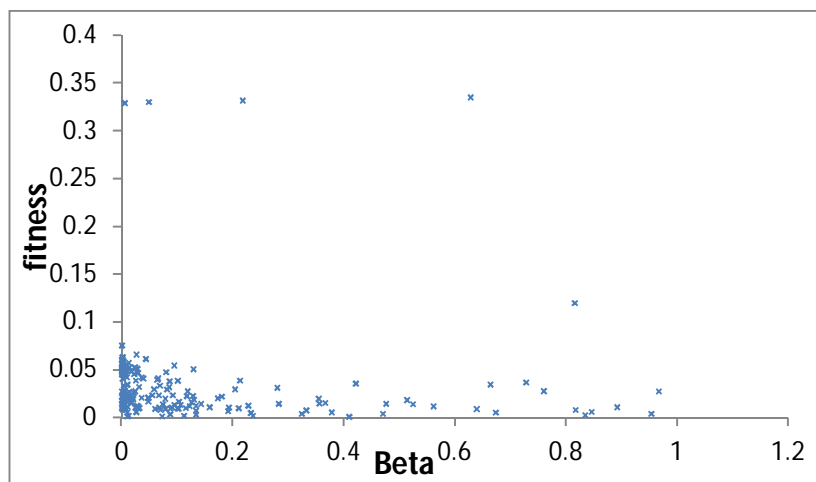
Dalla tabella si nota come questo procedimento abbia dato ottimi risultati, ma solo in pochi mesi dell'anno, in particolare per quelli invernali. Procedendo lungo l'anno, si nota un progressivo peggioramento della funzione obiettivo: per i mesi primaverili e autunnali, sebbene il fitness ottenuto sia accettabile, i parametri cui corrisponde non rientrano nei limiti richiesti. Per maggio, giugno e i mesi estivi invece, oltre a non rispettare i limiti, anche la funzione obiettivo non presenta valori adeguati per la calibrazione del modello.

Tabella 4.3: risultati ottenuti con programma evolutivo.

	$\lambda$ [h <sup>-1</sup> ]	$\beta$ [h <sup>-1</sup> ]	$\nu$ [-]	$\eta$ [h <sup>-1</sup> ]	$\zeta$ [h/mm]	Funzione obiettivo
gennaio	0.0493	12.9195	0.5899	8.3636	0.7126	0.000001
febbraio	0.0338	20.7189	0.4471	12.9433	0.5334	0.007772
marzo	0.1287	127.8396	6.7042	66.0678	2.2019	0.004810
aprile	0.1980	2509.4088	37569.1048	25.3095	152.1782	0.018950
maggio	39.7309	0.0190	0.0145	22.7390	0.1731	1.572741
giugno	0.0052	0.6014	0.0279	17.9308	0.0017	1.849942
luglio	0.2231	0.22556	0.0990	22.6943	0.0262	1.907520
agosto	0.3686	0.1549	0.0369	23.0047	0.0197	1.874852
settembre	0.0476	0.1035	0.0015	21.7924	0.0020	1.744476
ottobre	0.0906	6.0757	21.2210	314.9636	0.0116	0.000657
novembre	0.0794	18.1878	3.6105	46.0599	0.3050	0.021411
dicembre	0.0205	32.8467	0.5634	14.4565	0.6203	0.000000

Date le difficoltà incontrate nella calibrazione del modello con dati a 5 minuti, considerando la scarsa diffusione di questo tipo di base storica nel territorio, si è deciso di abbandonare questo procedimento per la ricostruzione di serie storiche sintetiche, optando per una più roduta calibrazione con dati orari. Le informazioni contenute nella serie storica a maggior risoluzione saranno sfruttate per la calibrazione di un disaggregatore efficiente.

In conclusione, si vuole riportare l'andamento della funzione obiettivo in funzione del parametro  $\beta$ , come fatto in precedenza. Il grafico è stato costruito prendendo tutti gli individui dell'ultima generazione del programma evolutivo, essendo quindi certi che lo spazio investigato sia una buona parte del dominio (in 5 dimensioni) del problema in esame.

Figura 4.10: andamento del fitness in funzione del parametro  $\beta$ .

A conferma di quanto ipotizzato in precedenza, la funzione presenta una moltitudine di minimi di valore simile, in corrispondenza di un ampio range di valori del parametro, a testimonianza della quantità di minimi locali presenti nella funzione presa in considerazione.

### 4.3 Generazione di una serie storica sintetica

Nella maggior parte dei siti dotati di stazioni pluviometriche, i dati disponibili sono al più registrati con scansione temporale oraria, se non superiore. Per questo motivo, unitamente alla difficoltà di stima riscontrata con dati a 5 minuti, in questo lavoro si è deciso di generare una serie sintetica a partire da dati orari di precipitazione.

In questo caso, con dati aggregati a scala oraria, è stato possibile utilizzare tutte le sezioni del programma RainSim: analisi della serie di dati, calibrazione dei parametri del modello e generazione di una serie sintetica di precipitazione.

L'analisi della serie di dati ha richiesto come dato in ingresso la serie storica aggregata a un'ora, e un file contenente le statistiche ricercate<sup>3</sup>, fornendo in uscita i risultati riportati in tabella 4.3.

Tabella 4.4: statistiche campionaria con dati aggregati a 1 h.

	Media [mm]	Varianza [mm <sup>2</sup> ]	Autocovarianza [mm <sup>2</sup> ]	Autocorrelazione [-]	Prob. Dry [-]
gennaio	0.10674	0.20540	0.17576	0.85644	0.89145
febbraio	0.10109	0.18831	0.15326	0.81393	0.90332
marzo	0.11520	0.26569	0.20714	0.77874	0.90860
aprile	0.13656	0.43464	0.24908	0.57327	0.90093
maggio	0.16067	0.82586	0.45448	0.54997	0.90387
giugno	0.09501	0.76057	0.23235	0.30508	0.95000
luglio	0.08098	1.01450	0.22327	0.21979	0.97273
agosto	0.11866	1.42406	0.65624	0.46021	0.96051
settembre	0.10281	0.80056	0.42212	0.52658	0.95622
ottobre	0.15150	0.96643	0.58645	0.60605	0.91513
novembre	0.10295	0.24894	0.18577	0.74550	0.90807
dicembre	0.07505	0.15186	0.12567	0.82721	0.92544

Una volta ottenuto il set di statistiche, su cui basare la calibrazione del modello, è necessario fornire al software dei valori di primo tentativo per i parametri, da cui far partire la procedura di fitting. Le equazioni implementate per la stima dei parametri sono quelle

<sup>3</sup> Per visualizzare il tipo di file e il formato richiesto dal software RainSim si rimanda all'Appendice A.

esposte nel Capitolo 3, mentre la funzione obiettivo del software (RinSim V.3), è leggermente diversa dalla (3.8),

$$S = \sum_{i=0}^m \frac{w_i^2}{f_s^2} \left(1 - \frac{f_i}{\hat{f}_i}\right)^2 \quad (4.1)$$

Dove  $f_s$  è un fattore di scala inserito per standardizzare ogni statistica per il suo valor medio annuale campionario, fatta eccezione per autocorrelazione e probabilità di tempo secco per le quali è posto pari a 1 (Burton et al.,2008).

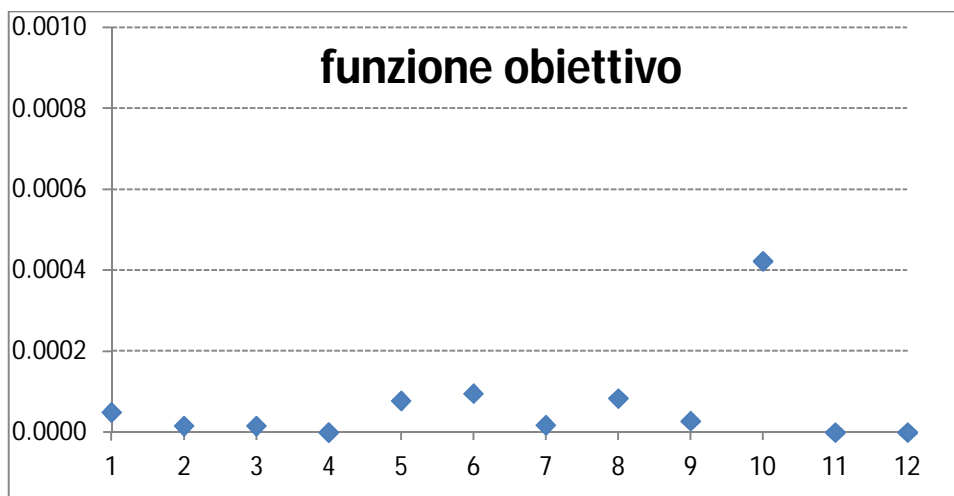


Figura 4.11: funzione obiettivo ottenuta per i mesi dell'anno.

Tabella 4.5: risultati della calibrazione del modello.

	$\lambda$ [h <sup>-1</sup> ]	$\beta$ [h <sup>-1</sup> ]	$\nu$ [-]	$\eta$ [h <sup>-1</sup> ]	$\zeta$ [h/mm]
gennaio	0.006271	0.093591	8.219475	0.356602	1.358304
febbraio	0.010989	0.499999	22.26604	0.777563	3.115751
marzo	0.011178	0.499999	21.84593	0.955881	2.21924
aprile	0.017674	0.491978	9.074598	1.71127	0.686296
maggio	0.023423	0.023423	1.995785	0.998911	0.291059
giugno	0.030379	0.03042	0.939052	2.201321	0.136249
luglio	0.023119	0.16721	0.801883	3.208392	0.071328
agosto	0.014456	0.020014	1.22692	1.320826	0.113106
settembre	0.02136	0.021384	0.958036	1.064605	0.186872
ottobre	0.049924	0.157265	0.635368	0.836768	0.24986
novembre	0.009319	0.258141	10.53942	0.832417	1.146115
dicembre	0.008815	0.442246	6.672965	0.482961	1.622785

Il valore della funzione obiettivo ottenuto per i vari mesi, riportato in figura 4.7, mostra l'ottimo risultato ottenuto. In tabella 4.4 sono riportati i parametri stimati. Come nel caso di calibrazione con dati a 5 minuti, si nota un peggioramento della funzione obiettivo nei mesi estivi, a partire da maggio sino ad arrivare a ottobre, anche se in questo caso il decadimento è decisamente contenuto in confronto al caso precedente.

Calibrato il modello, è possibile generare una serie storica sintetica. Con il software utilizzato, si producono una serie di dati di lunghezza arbitraria e con scansione temporale del secondo, dato che, nel programma, è implementato un disaggregatore. Avendo stimato con dati orari i parametri del modello, si è deciso di generare dati a scansione oraria. Nel prossimo paragrafo verrà analizzata la qualità della generazione.

#### 4.4 Validazione del modello

Una volta stimati i parametri del modello NSRP, è necessario verificare che le serie di dati abbiano caratteristiche analoghe a quelle reali al sito di interesse. Data la natura stocastica e non deterministica del modello adottato, non ci si aspetta che la serie sintetica riproduca fedelmente quella misurata, si valutano invece le caratteristiche statistiche dell'una rispetto all'altra.

A titolo di esempio, si riportano i grafici relativi a due anni, uno generato e uno misurato, presi casualmente, dai quali si può “visivamente” verificare che i due campi di precipitazione sono quantomeno confrontabili; successivamente sono esposte le più accurate analisi quantitative.

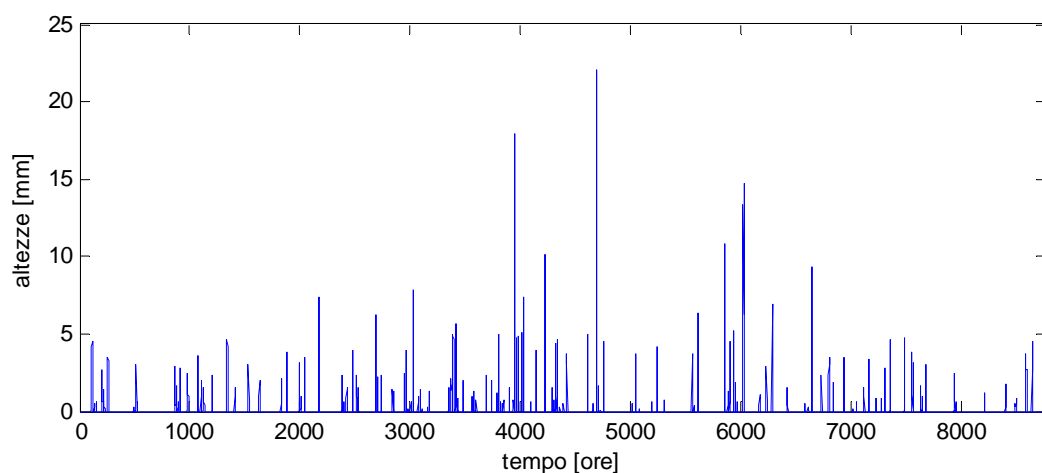


Figura 4.12: esempio di un anno generato

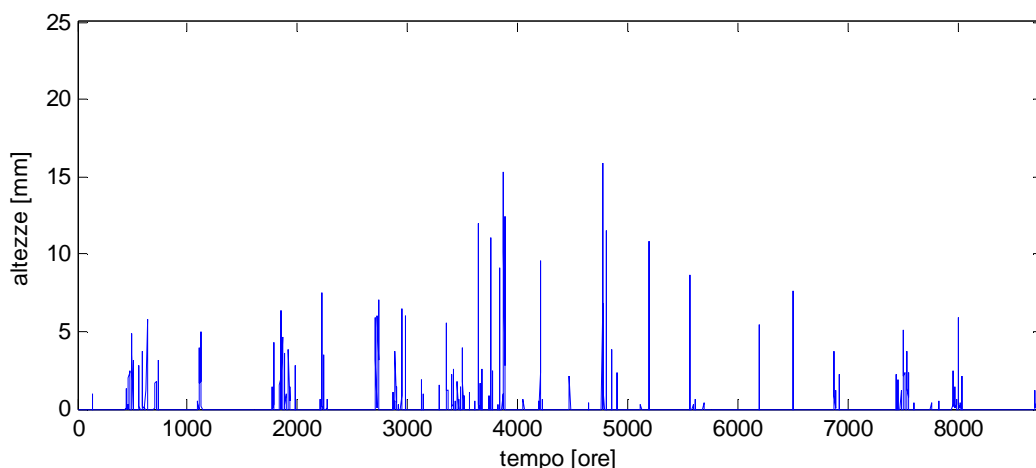


Figura 4.13: esempio di un anno misurato (1971).

#### 4.4.1 Verifica delle statistiche annuali

La serie storica generata è a scansione oraria per una lunghezza pari a 100 anni, in modo da raggiungere una discreta stabilità delle statistiche che la descrivono. In tabella le statistiche sulle altezze complessive annuali, ricavate per la serie generata in confronto a quelle misurate.

Tabella 4.6: confronto tra statistiche sulle altezze cumulate annuali tra serie generata e serie misurata

	Serie generata	Serie misurata
Media [mm]	965.8	985.3
Deviazione standard [mm]	138.6	221.6
Massimo [mm]	1462.3	1434.8

Le statistiche vengono riprodotte bene, con una leggera sottostima per quanto riguarda le altezze annuali. In figura sono riportate le altezze annuali generate e misurate, è abbastanza chiaro come complessivamente la variabilità della serie generata sia simile a quella della serie misurata.

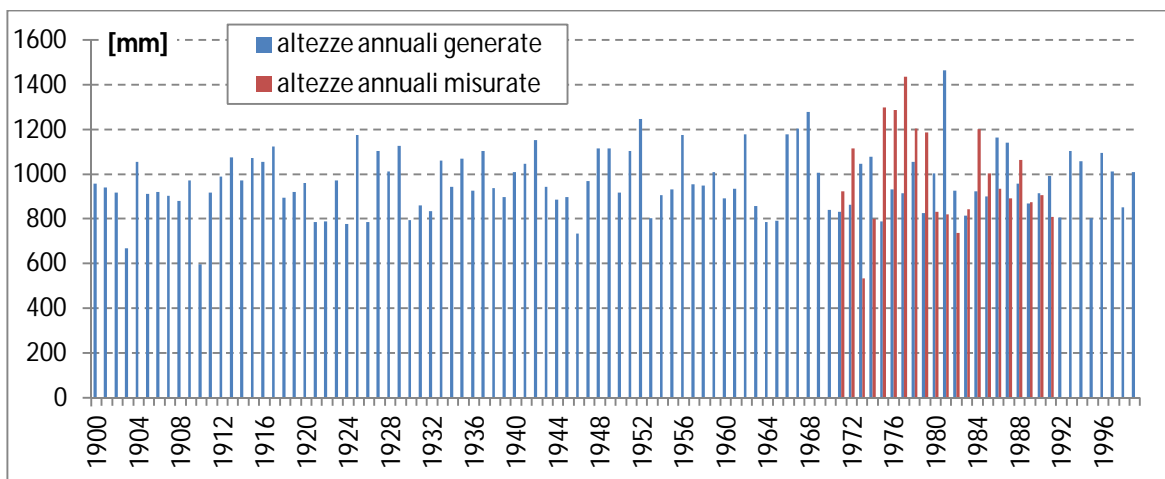


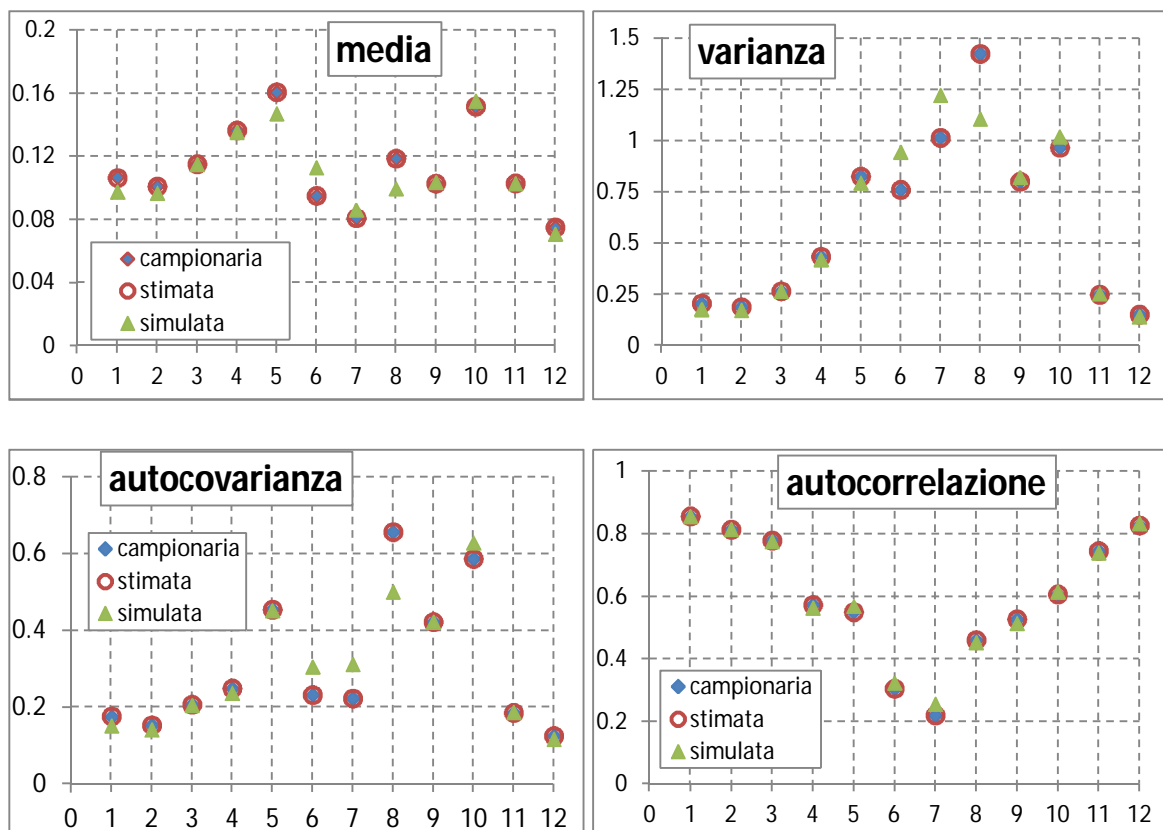
Figura 4.14: confronto delle altezze cumulate annuali tra serie generata e serie misurata

#### 4.4.2 Verifica delle statistiche riprodotte

La prima verifica alla serie storica generata è stata rivolta alla capacità di riprodurre le statistiche utilizzate nella stima dei parametri. Sono state valutate, oltre alla media, anche le statistiche del secondo ordine, varianza autocovarianza e autocorrelazione, entrambe con lag pari a un'ora, e probabilità di periodo secco.

In figura 4.15 sono state messe a confronto le diverse statistiche, in blu le statistiche estratte dai dati di altezza disponibili, con aggregazione temporale pari a un'ora, il cerchio rosso si riferisce invece alle quantità stimate tramite le formule del modello NSRP (Capitolo 3), in verde sono riportate infine le statistiche calcolate sulla serie di dati generata.

I risultati ottenuti confermano la buona riuscita della calibrazione del modello e della generazione. Le statistiche stimate e misurate si sovrappongono quasi perfettamente, mentre quelle generate mostrano un ottimo andamento per quanto riguarda autocorrelazione e probabilità di periodo secco, mentre, per quanto riguarda media varianza e autocovarianza, sono presenti delle lievi differenze concentrate nei mesi estivi, a conferma dell'intrinseco problema del modello nel riprodurre la realtà in questo periodo. L'entità dello scostamento è comunque molto limitata, si può dunque sostenere che questa verifica sia andata a buon fine.





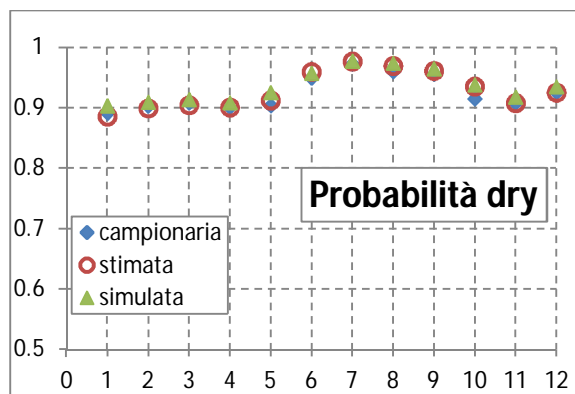


Figura 4.15: confronto tra statistiche misurate, stimate con modello NSRP e generate.

#### 4.4.3 Verifica delle Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica

La seconda verifica riguarda invece la buona riproduzione della distribuzione dei massimi annuali. In particolare è valutato come la serie generata si adatti alle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, stimate per il sito di studio.

Per questa operazione si sono estratti i massimi annuali della serie generata, per durate pari a 1, 3, 6, 12 e 24 ore. Una volta estratti, sono stati valutati i massimi per tempi di ritorno di 2, 5 e 10 anni, per poi confrontarle con le LSPP stimate. Queste ultime presentano la seguente espressione (Mignosa et al., 1992):

$$I(\vartheta) = \frac{A(T)}{(B+\vartheta)^C} \quad (4.2)$$

Dove  $A$ ,  $B$  e  $C$  sono parametri stimati delle linee, mentre  $\vartheta$  è la durata. I parametri stimati per il sito di Milano via Monviso sono riportati in tabella.

Tabella 4.7: parametri delle LSPP stimati per il sito di studio (Mignosa et al., 1992).

T [anni]	A [mm/h <sup>(1-C)</sup> ]	B [h]	C [-]
2	36.3	0.175	0.84
5	46.2	0.175	0.84
10	53	0.175	0.84

Le curve sono riferite alle intensità di pioggia in funzione della durata, per questo è stato necessario convertire le altezze in intensità prima del confronto. Le intensità estratte dalla serie generata sono riportate in tabella 4.8.

Tabella 4.8: intensità estratte dalla serie generata.

T [anni]	1h [mm/h]	3h [mm/h]	6h [mm/h]	12h [mm/h]	24h [mm/h]
10	39.40	20.03	12.52	7.84	3.92
5	33.00	18.83	9.87	5.78	3.31
2	25.20	13.43	7.65	4.08	2.20

In figura 4.15 è riportato il confronto eseguito. Come si può notare, i massimi estratti dalla serie generata si sovrappongono abbastanza bene alle LSPP, soprattutto per le linee riferite a tempi di ritorno, pari a 2 e 5 anni. Per la serie con tempo di ritorno maggiore, la sovrapposizione, pur restando molto buona, comincia a peggiorare. La spiegazione a questa tendenza risiede nel fatto che, nella calibrazione del modello, non si sono utilizzate statistiche del terzo ordine (la skewness), necessarie per l'adeguata riproduzione dei valori estremi (Cowpertwait, 1998). Questa differenza risulterebbe più marcata andando ad analizzare tempi di ritorno superiori, ma non ricopre un aspetto importante per questo studio, rivolto a riprodurre le precipitazioni più frequenti.

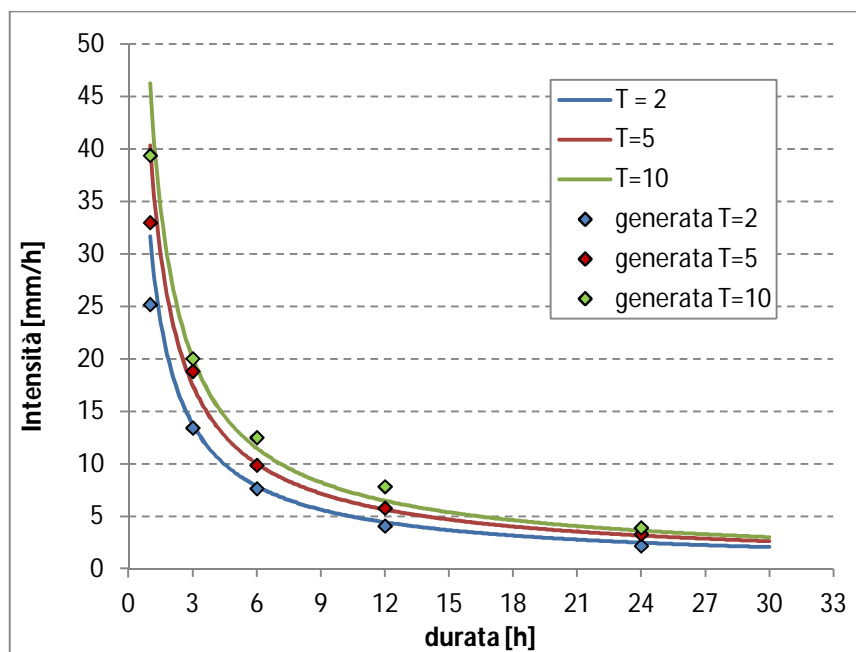


Figura 4.16: confronto tra LSPP e massimi estratti dalla serie generata.

## 4.5 Conclusioni

In questo capitolo si è cercato di implementare il modello NSRP, utilizzando come obiettivo le statistiche calcolate su dati a 5 minuti. Data la natura della funzione obiettivo,

che presenta molti minimi locali, è stato necessario implementare tecniche di calcolo evolutivo per la stima dei parametri. Entrambi gli algoritmi adottati (Algoritmi Genetici e Programmi Evolutivi) si sono dimostrati inadeguati alla riproduzione della precipitazione nel sito di studio, si è per questo deciso di operare una calibrazione con dati orari, e utilizzare le informazioni contenute nella serie a più alta risoluzione per calibrare un disaggregatore (Capitolo 5).

La stima è stata quindi eseguita con il software RainSim V.3 e ha condotto a ottimi risultati in termini di funzione obiettivo. Con i parametri stimati si è generata una serie storica sintetica di 100 anni, e si è verificata la compatibilità di questa con il campo reale, mediante l'analisi delle statistiche e il confronto dei massimi generati, con le linee segnalatrici stimate con i dati misurati.

Nei prossimi capitoli verrà studiato un metodo per disaggregare in modo efficiente la serie, sino alla risoluzione temporale, utile alla valutazione del funzionamento delle vasche di prima pioggia.

## Capitolo 5:

# DISAGGREGAZIONE STOCASTICA DI SERIE DI PIOGGIA

## 5.1 Introduzione

Le stazioni di misura distribuite sul territorio registrano dati atmosferici con una certa scansione temporale. Fatta eccezione per alcune stazioni, la risoluzione con cui vengono archiviati i dati di precipitazione è solitamente oraria<sup>1</sup>. Se per applicazioni di tipo idrologico a scala regionale questi dati sono adeguati, non si può dire lo stesso per applicazioni di idrologia urbana. A causa della diversità di tempo critico: in caso di bacini montani molto acclivi risulta sicuramente nell'ordine delle ore, mentre in caso di grandi aree di pianura, può essere di giorni. Nel caso di bacini urbani, nella maggior parte delle sezioni si hanno tempi critici inferiori all'ora, a causa delle aree ridotte e delle superfici impermeabili.

Per una simulazione in continuo dell'andamento delle portate in sistemi fognari urbani sono dunque necessari dati a scala inferiore all'ora. Una soluzione potrebbe essere aumentare il numero di stazioni con registrazione a scala sub oraria, come quella di Milano via Monviso, ma data l'onerosità di tale operazione e la necessità di serie continue di lunghezza significativa, nelle ultime due decadi sono stati studiati diversi modelli per la disaggregazione dei dati disponibili.

Uno dei primi approcci proposti in letteratura è quello di Ormsbee, (1989). Nello studio si cercava di superare la progettazione a evento (design storm approach), per i sistemi fognari, a favore di un approccio continuo, con lo scopo di avere un'adeguata riproduzione del comportamento reale, e delle condizioni al contorno (come ad esempio i livelli presenti a inizio evento). I due modelli proposti nello studio si proponevano di disaggregare un dato

---

<sup>1</sup> In alcuni casi, ormai fortunatamente sempre più rari, il volume di precipitazione è archiviato a scala giornaliera

orario mantenendo l'andamento che il dato stesso presenta rispetto all'ora precedente e alla successiva (vedi figura 5.1). I due modelli proposti sono di carattere deterministico, il primo con approccio discreto mentre il secondo con approccio continuo.

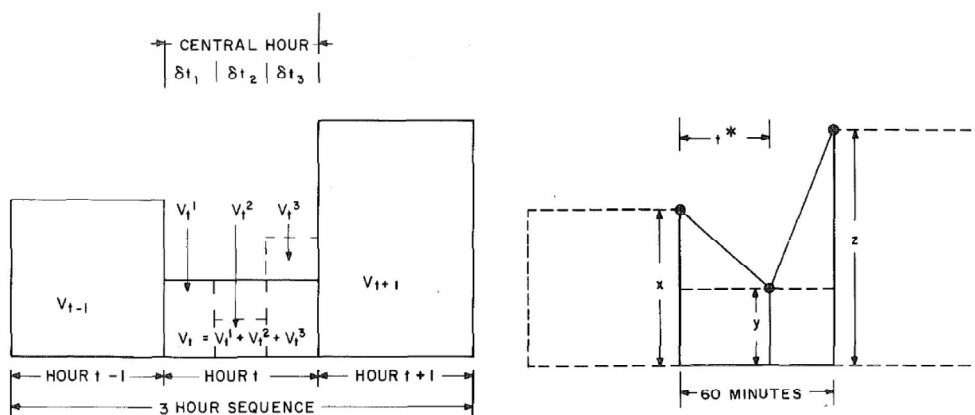


Figura 5.1: esempio dei modelli deterministici discreto (destra) e continuo (sinistra) proposti da L.E. Ormsbee, 1989.

Altri esempi di modelli deterministici si possono ritrovare negli studi di Durrans et al., (1999), che proponeva un approccio alla disaggregazione con funzioni polinomiali, oppure in Hingray & Haha (2005), dove tra gli altri viene considerato un modello che valuta costante l'altezza di pioggia lungo l'ora. In diverse pubblicazioni sono confrontate le performance dei modelli deterministici, e nella maggior parte ne vengono messi in evidenza i limiti nel riprodurre alcune importanti statistiche delle serie utilizzate per la calibrazione, tanto da sconsigliarne l'utilizzo (Hingray & Haha 2005, Onof et al., 2005).

A causa dell'inefficacia dimostrata dai modelli deterministici sono stati studiati dei metodi stocastici di disaggregazione, basati sull'ipotesi di autosomiglianza<sup>2</sup> temporale (e spaziale) del processo di precipitazione, (Gupta & Waymire 1993, Over 1995, Over & Gupta 1996). Tale proprietà si basa sull'osservazione del campo di pioggia a diverse scale temporali (e spaziali), ed è stata utilizzata per creare modelli di disaggregazione chiamati random multiplicative cascade.

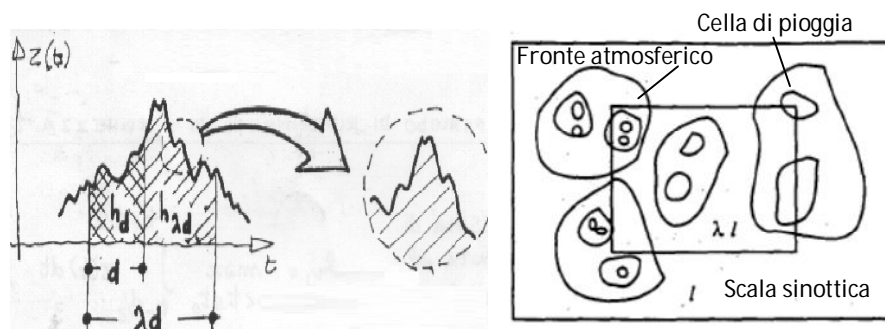


Figura 5.2: schematizzazione della proprietà di autosomiglianza temporale (a destra) e spaziale (a sinistra).

<sup>2</sup> Questa proprietà è alla base anche della formulazione scala invariante delle LSPP.

Questi modelli sono stati creati per studi sulla turbolenza, nel tentativo di produrre campi e serie con proprietà statistiche scala invarianti (Yaglom, 1996; Mandelbrot, 1974). Partendo dal confronto tra turbolenza e campo di pioggia sono quindi stati sviluppati negli anni diversi modelli per generazione di campi di pioggia multi frattali (Gupta & Waymire 1993, Over & Gupta 1996, Menabde et al., 1997).

I modelli presenti in letteratura si basano fondamentalmente sulla moltiplicazione del dato di altezza di pioggia per un valore random estratto da una distribuzione assegnata, non necessariamente compreso tra 0 e 1, per ripartire la massa iniziale in un numero, detto branching number, di sotto intervalli di tempo, l'operazione viene ripetuta "a cascata" sino ad arrivare a una suddivisione degli intervalli di tempo di risoluzione desiderata (vedi figura 5.3).

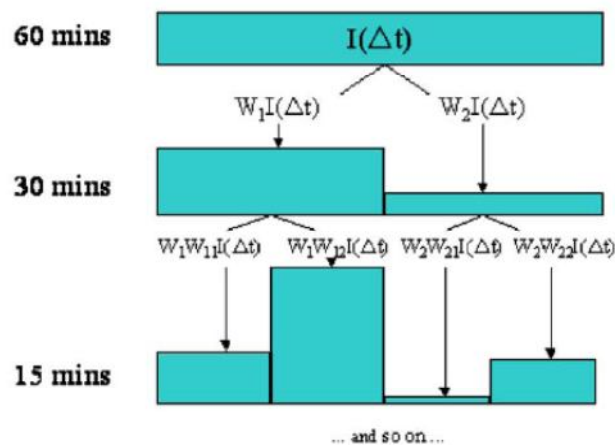


Figura 5.3: esempio di disaggregazione con modelli multiplicative random cascades (da Onof et al., 2005).

I modelli random multiplicative cascade (RMC) proposti in letteratura possono essere distinti in due sottocategorie, in base ad alcune loro proprietà: se la massa totale di pioggia viene conservata in media vengono chiamati *canonici* (Over & Gupta, 1996), mentre se tale grandezza viene conservata esattamente vengono detti *microcanonici* (Menabde & Sivapalan 2000). Diversi studi hanno cercato di stabilire quale dei due modelli sia migliore, con risultati a volte contrastanti: Molnar & Burlando (2005) hanno ottenuto migliori risultati con i modelli canonici, mentre Hingray & Haha (2005) al contrario hanno riscontrato una migliore performance con i modelli microcanonici. Entrambi gli studi si sono basati su dati svizzeri che, seppur di diverse stazioni (Zurigo e Pully), appartengono alla stessa fascia climatica: non è quindi per ora univocamente dimostrato quale sia il migliore. Nello studio di Onof et al., (2005), è stato inoltre dimostrato come il disaggregatore implementato nel software Stormpac (versione commerciale di RainSim), fornisca prestazioni peggiori rispetto a un modello RMC. Per questo studio si quindi è

deciso di utilizzare un modello multiplicative random cascade canonico, per la semplicità di stima dei parametri e la buona affidabilità dimostrata.

## 5.2 Canonical Random Cascade Model

I modelli canonical random multiplicative cascade (cRMC) disaggregano la massa di pioggia tramite suddivisioni regolari in  $b$  (branching number) sub intervalli di uguale dimensione temporale. Con  $n$  si indica il numero di livelli di suddivisione della massa di pioggia, che portano alla risoluzione desiderata. In ogni livello sono presenti  $i$  intervalli, che vanno da 1 per il dato di partenza, a  $b^n$  nell'ultimo livello di suddivisione. Un intervallo presente all'ultimo livello di suddivisione è indicato con  $\Delta_n^i$ .

La massa viene disaggregata lungo i livelli in ogni intervallo, al livello  $\Delta_n^i$  la massa nell' $i$ esimo intervallo è data dalla seguente relazione.

$$\mu_n(\Delta_n^i) = r_0 \lambda_n \prod_{j=1}^n W_j(i) \quad (5.1)$$

valida per  $i = 1, 2, \dots, b^n; n \geq 0$

Nella (5.1)  $r_0$  indica la massa (o altezza di pioggia) iniziale, corrispondente al dato di partenza,  $\lambda_n = b^{-n}$  è un fattore di scala, mentre  $W$  è chiamato *cascade generator*, ed è il responsabile della ripartizione della massa.

### 5.2.1 Cascade Generator

Il cuore del processo di disaggregazione è il moltiplicatore  $W$ , trattandosi di modelli stocastici il suo valore è estratto casualmente da una distribuzione di probabilità assegnata. Nei modelli cRMC il cascade generator è definito come prodotto di due fattori. Si riporta di seguito la formulazione proposta da Molnar e Burlando (2005).

$$W = BY \quad (5.2)$$

$B$  è un fattore che descrive la probabilità di avere un sottointervallo privo di precipitazione. Risulta un aspetto importante se il dato di partenza della disaggregazione è a bassa risoluzione temporale, ad esempio a scala giornaliera, ed è descritto come segue.

$$P(B = 0) = 1 - b^{-\beta}; P(B = b^\beta) = b^{-\beta} \quad (5.3)$$

Dove  $\beta$  è un parametro che caratterizza la distribuzione.

$Y$  è invece responsabile della ripartizione della massa nei sub intervalli, assume valori strettamente positivi ed è descritto da una distribuzione arbitraria. Nello studio di Gaume et al., (2007), vengono analizzate diverse distribuzioni (tra le altre si ricordano le distribuzioni uniforme, log-normale, log-poissoniana), senza però identificarne nessuna che si distingua sensibilmente dalle altre, tanto che nella fase di validazione la scelta dei modelli è definita arbitraria. La distribuzione utilizzata in questo studio è tratta da Molnar & Burlando (2005).

$$Y = b^{-\sigma^2 \frac{\ln b}{2} + \sigma X} \quad (5.4)$$

Nella quale  $\sigma^2$  rappresenta la varianza di  $Y$ , mentre  $X$  è una v.a. distribuita come una normale di media 0 e varianza 1. Per come è strutturato il valore atteso di  $Y$  dovrebbe essere pari all'unità, in modo da garantire in media la conservazione della massa totale di precipitazione. In realtà durante l'implementazione del modello è stato riscontrato che questa assunzione risulta vera per  $\sigma^2$  che tende a 0. Al fine di garantire la conservazione della massa in media si è modificata la (5.4) dividendola per la sua media.

$$Y' = b^{-\sigma^2 \frac{\ln b}{2} + \sigma X} / E(Y) \quad (5.5)$$

In figura sono riportate le distribuzioni nella configurazione originale e in quella modificata, le due versioni sono del tutto analoghe con la differenza che nel caso modificato viene garantito il valore atteso pari a 1.

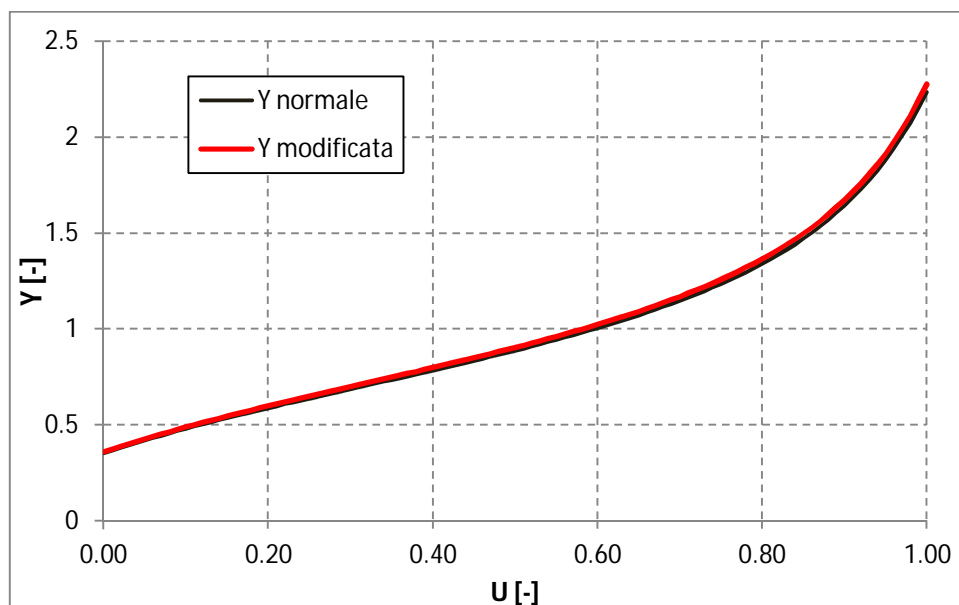


Figura 5.4: distribuzioni di  $Y$  e  $Y'$  (con  $\sigma^2=0.41$ ).



Unendo le due componenti del generatore si giunge alla sua definizione completa.

$$P(W = 0) = 1 - b^{-\beta}; P\left(W = b^{\beta} Y' = \frac{b^{\beta - \sigma^2 \frac{\ln b}{2} + \sigma X}}{E(Y)}\right) = b^{-\beta} \quad (5.3)$$

Il modello è quindi descritto da due soli parametri:  $\beta$  che descrive la possibilità di intermittenza nella precipitazione, e  $\sigma^2$  che invece descrive il moltiplicatore  $Y$ .

### 5.2.2 Moment Scaling

Per il modello proposto esistono alcune importanti proprietà del cascade generator  $W$  che vengono sfruttate per la calibrazione dei parametri (Over & Gupta, 1996).

Si è osservato come il comportamento dei momenti di ensemble, cioè dei momenti della distribuzione teorica del generatore  $W$ , in funzione del fattore di scala  $\lambda_n$  sia lineare in un piano logaritmico. La pendenza della funzione di scala ( $\chi(q)$ ) che lega momenti di ensemble e fattore di scala, è nota come Mandelbrot-Kahane-Peyriere (MKP), (Mandelbrot, 1974; Kahane & Peyriere 1976).

$$\chi(q) = 1 - q + \log_b E(W^q) \quad (5.4)$$

Dove  $q \geq 0$  indica l'ordine del momento  $E(W^q)$ .

Si utilizza la pendenza della funzione di scala in quanto al crescere dei sottolivelli ( $n \rightarrow \infty$ ), i momenti di ensemble divergono a infinito o convergono a zero (a seconda della pendenza), ed è quindi preferibile alla funzione di scala nella fase di calibrazione (Molnar & Burlando, 2005).

I momenti campionari vengono invece definiti dalla seguente relazione (Over & Gupta, 1994).

$$M_n(q) = \sum_{i=1}^{b^n} \mu_n^q(\Delta_n^i) \quad (5.5)$$

Dove  $\mu_n^q(\Delta_n^i)$  indica *i*esimo valore del livello *n*-esimo di disaggregazione temporale elevato all'ordine del momento che si vuole calcolare. Al crescere di *n* i momenti campionari convergono verso i momenti di ensemble, ed è proprio questa la proprietà sfruttata nella calibrazione.

Come nel caso precedente si utilizza la pendenza della funzione di scala (in questo caso indicata con  $\tau(q)$ ), che lega linearmente, in piano logaritmico, i momenti  $M_n(q)$  calcolati

per i diversi sottolivelli di disaggregazione al fattore di scala  $\lambda_n$ . Viene determinata dalla seguente relazione.

$$\tau(q) = \lim_{\lambda_n \rightarrow 0} \frac{\log M_n(q)}{-\log \lambda_n} \quad (5.6)$$

La (5.6) definisce quindi che al crescere di  $n$  ( $\lambda_n = b^{-n}$ ) il rapporto tra logaritmi dei momenti di ordine  $q$ , calcolati per gli  $n$  livelli di aggregazione temporale, e il relativo fattore di scala tende a coincidere con la pendenza della funzione di scala dei momenti campionari. Allo stesso tempo, per quanto detto in precedenza la  $\tau(q)$ , ricavata con dati campionari, tende a convergere a  $\tau(q)$ . Sfruttando questa proprietà si vanno a stimare i parametri che caratterizzano la distribuzione di  $W$ .

### 5.3 Calibrazione del modello

Per la calibrazione del modello è necessario definire il livello di disaggregazione desiderato. In questo lavoro si desidera disaggregare i dati orari generati sino a una risoluzione compatibile con lo studio delle vasche di prima pioggia. Per questo motivo è stato fissato il branching number, cioè il numero di sottointervalli equi temporali nei quali viene distribuita la massa durante i livelli di disaggregazione, pari a  $b = 2$ . Il numero di livelli invece è invece stato posto pari a 3 ( $n = 0,1,2$ ), in questo modo il dato a un'ora viene disaggregato in dati a 15 minuti, quindi con una risoluzione adeguata alle applicazioni in esame.

Per la calibrazione si sono sfruttate le proprietà delle funzioni di scala esposte in precedenza. In particolare con la distribuzione adottata per il generatore  $W$  la funzione MKP prende la seguente formulazione (Over & Gupta, 1994).

$$\chi(q) = \tau(q) = (\beta - 1)(q - 1) + \sigma^2 \frac{\ln b}{2} (q^2 - q) \quad (5.7)$$

La (5.7) lega dunque la pendenza delle funzioni di scala all'ordine del momento, in funzione dei parametri  $\beta$  e  $\sigma^2$ .

I passi per la stima dei parametri sono stati i seguenti.

- Si è aggregata la serie di dati misurati (a 5 minuti) alle risoluzioni temporali di 15, 30 e 60 minuti. Con queste serie si sono calcolati momenti campionari definiti dalla (5.4), partendo da  $q = 0$  sino a  $q = 4$  con passo 0.25.

- Per ogni valore  $q$ , in base alla (5.6), si sono plottati i valori dei momenti in funzione del fattore di scala  $\lambda_n$ . Tramite un'interpolazione lineare dei dati (evidenziati dagli indicatori nel grafico in figura 5.5<sup>3</sup>) così ottenuti, si sono determinate le pendenze  $\tau(q)$  (ricavate dalle rette interpolanti).

Tabella 5.1: pendenze estratte dai momenti campionari

$q$	$\tau(q)$
0.00	1.0000
0.25	0.6619
0.50	0.4370
0.75	0.2137
1.00	0.0000
1.25	-0.1963
1.50	-0.3695
1.75	-0.5177
2.00	-0.6740
2.25	-0.7541
2.50	-0.8547
2.75	-0.9503
3.00	-1.0926
3.25	-1.1359
3.50	-1.2276
3.75	-1.3187
4.00	-1.4427

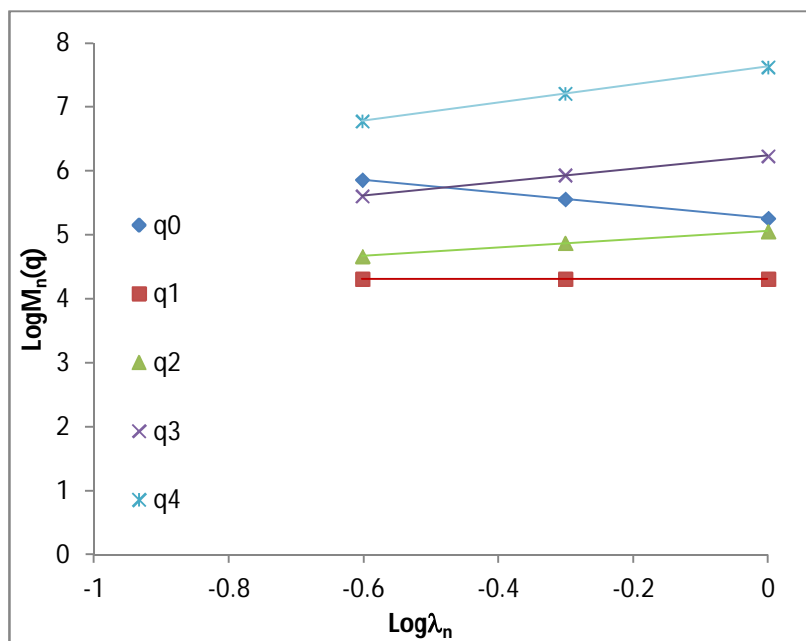


Figura 5.5: grafico con dal quale si sono ricavati i valori di  $\tau(q)$ .

- A questo punto si è in possesso dei valori della  $\tau(q)$  in funzione dell'ordine dei momenti  $q$ . Applicando la definizione della funzione MKP fornita dalla (5.7) ( $\chi(q) = \tau(q)$ ) è possibile procedere alla stima dei parametri: si riportano su un grafico i valori riportati in tabella 5.1 (figura 5.6) e si applica la (5.7) per ricavare direttamente il valore di  $\beta$ :

$$\tau(0) = -(\beta - 1) \rightarrow \beta = \tau(0) - 1 = 1 - 1 = 0 \tag{5.8}$$

Questo risultato indica l'impossibilità di avere un intervallo di 15 minuti secco durante un'ora piovosa, e è quindi accettabile. Probabilmente se si fossero

<sup>3</sup> In figura 5.5 non sono stati riportati tutti i momenti calcolati per non perdere leggibilità. I risultati sono comunque inseriti nella tabella 5.1.

aggregati i dati di partenza a risoluzioni più basse (ad es. dati giornalieri), avrebbe assunto un valore positivo, in accordo con l'evidenza fisica del fenomeno.

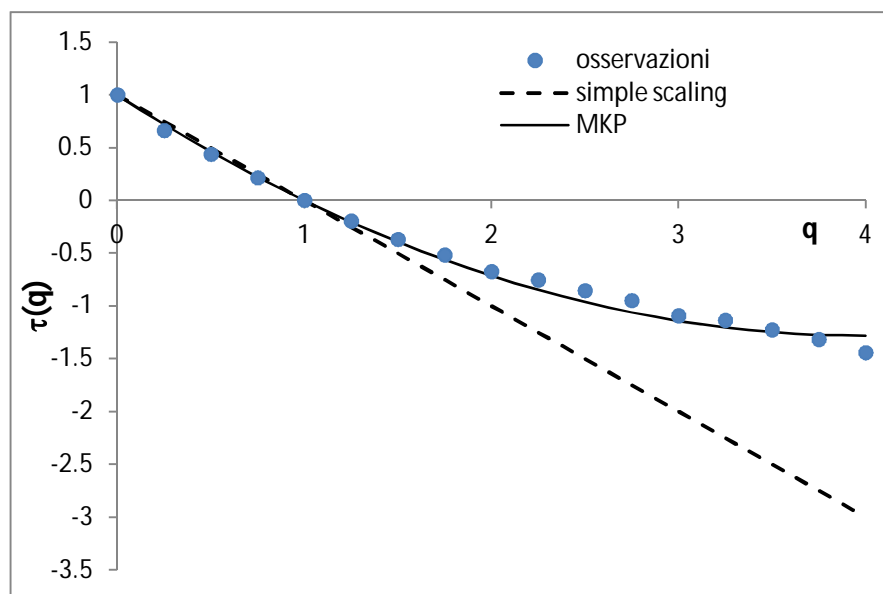


Figura 5.6: funzione MKP calcolata sulla base delle osservazioni

- Per la stima del secondo parametro si è implementata sullo stesso grafico la funzione MKP (5.7), con un valore di tentativo di  $\sigma^2$ . Impostando poi una stima ai minimi quadrati si è adattata la funzione MKP alla  $\tau(q)$  (indicato in figura 5.6 e alla serie “osservazioni”), ottenendo  $\sigma^2 = 0.413$ .

Si è dunque definita la distribuzione del cascade generator, che in questo caso è ridotta alla sola distribuzione del moltiplicatore  $Y'$ . I risultati portano a considerare nulla la probabilità di avere un sottointervallo secco durante un'ora piovosa ( $\beta = 0$ ), mentre la varianza della distribuzione è stata stimata pari a  $\sigma^2 = 0.413$ . Nel prossimo paragrafo verranno validati i risultati ottenuti.

#### 5.4 Validazione del modello

La prima operazione per la verifica del buon funzionamento del modello di disaggregazione utilizzato è stata una visualizzazione di grafici relativi alle altezze annuali a 15 minuti di un anno preso in modo casuale, mettendo a confronto i dati misurati con quelli disaggregati, per valutarne la compatibilità.

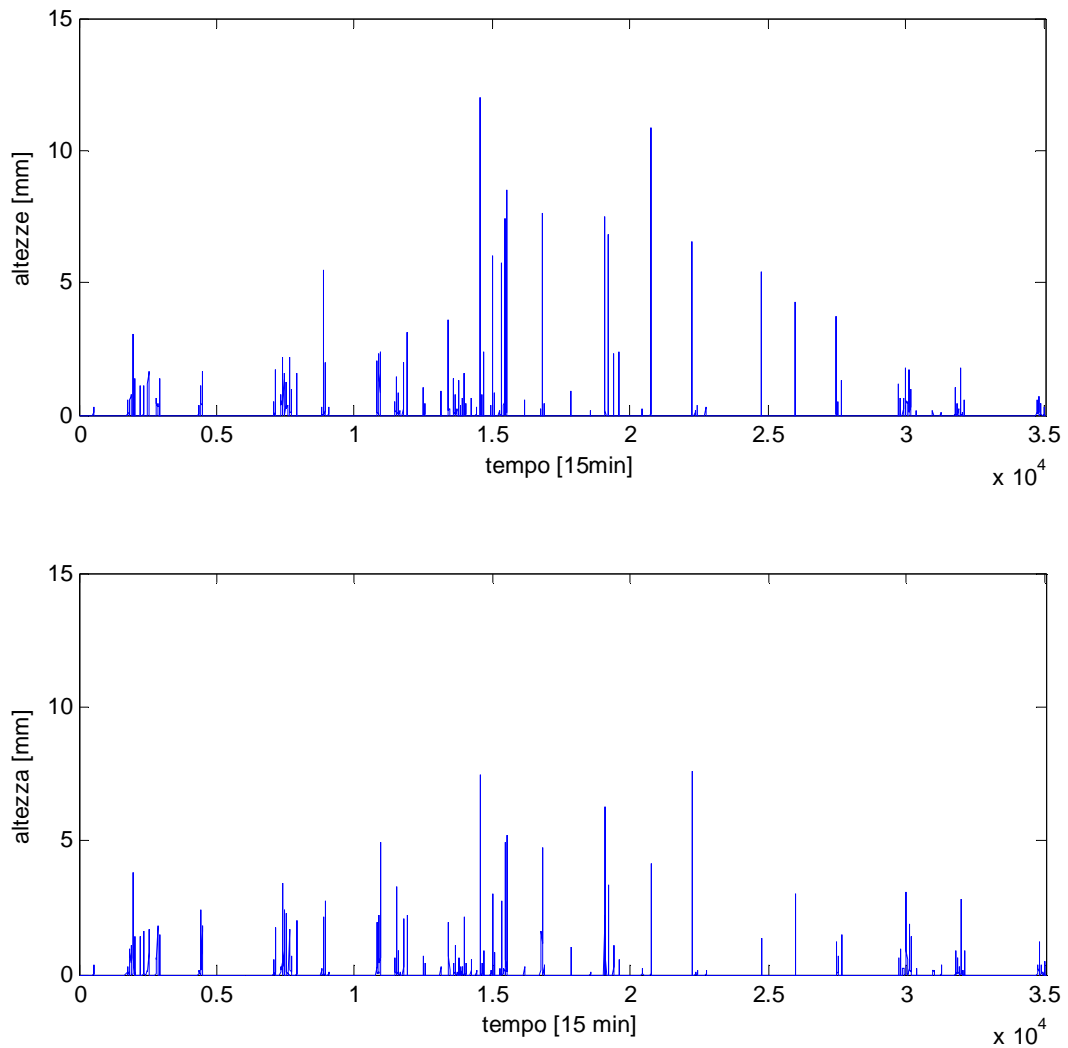


Figura 5.7: confronto tra serie di altezza di pioggia del 1971 a 15 minuti misurata (sopra) e disaggregata (sotto).

In figura 5.7 sono riportate le serie misurate e disaggregate relative all'anno 1971. Nella serie disaggregata si nota la difficoltà di riproduzione dei massimi annuali, anche se complessivamente il campo di pioggia sembra ben riprodotto.

#### 5.4.1 Conservazione della massa totale

Un importante caratteristica, che si presenta anche nella definizione del cRMC, è la conservazione in media della massa totale di precipitazione. Da questo punto di vista il modello sembra funzionare abbastanza bene: in figura 5.8 è riportato un confronto tra le altezze cumulate annuali misurate e disaggregate, con risultati più che soddisfacenti.

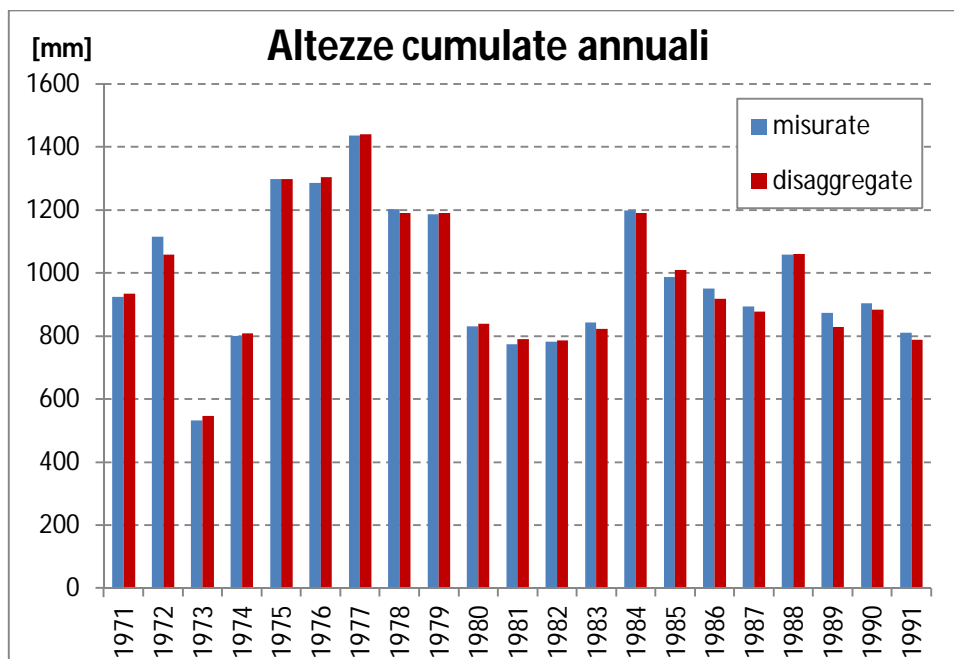


Figura 5.8: confronto tra altezze cumulate annuali misurate e disaggregate.

Questa verifica è stata fatta anche sulla serie di cento anni generata, che presenta risoluzione oraria, in quanto il confronto è sulla cumulata annuale (vedi figura 4.9).

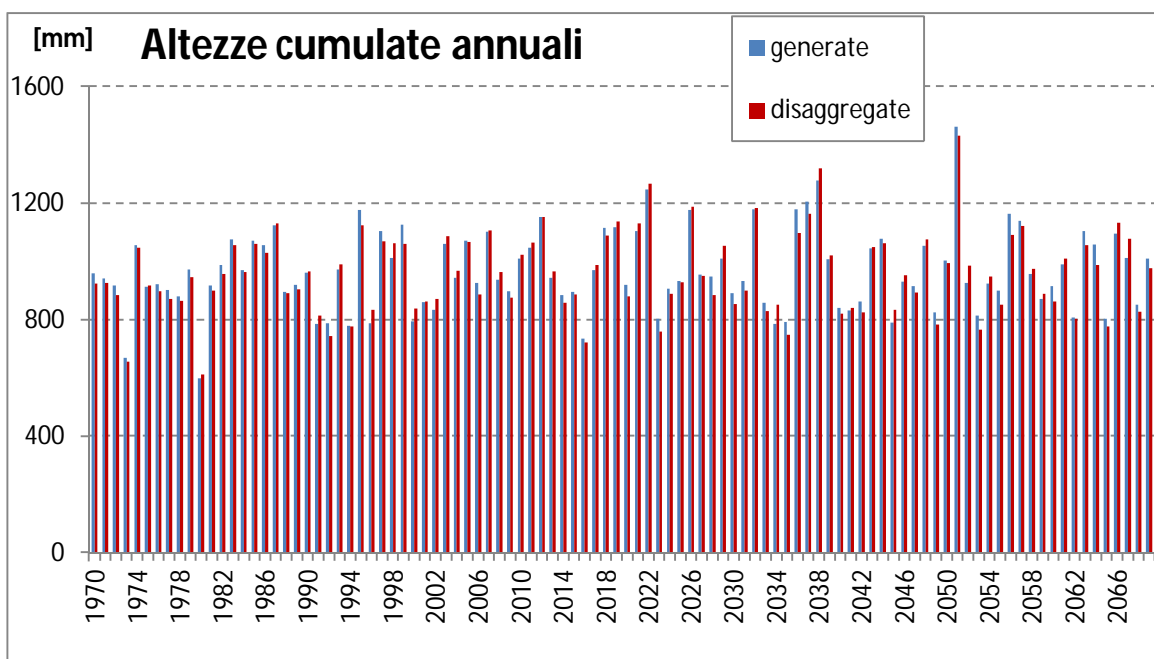


Figura 5.9: confronto tra altezze cumulate annuali generate e disaggregate.

Oltre alla valutazione grafica è stata eseguita anche una quantificazione numerica dell'errore commesso nella disaggregazione. L'errore totale è stato valutato come media degli errori annuali, sia mantenendo il segno per valutare l'errore totale sulla massa misurata nei vari anni, sia come media dei valori assoluti degli errori, per valutare la media

annuale delle differenze tra dati di partenza e dati disaggregati. Come per il caso precedente si sono valutate le prestazioni sia sulla serie misurata (21 anni) che sulla serie generata (100 anni) (vedi tabella 5.2).

Tabella 5.2: errori commessi nel processo di disaggregazione, sia con dati misurati che con dati generati.

	misurata		generata	
	normale	assoluti	normale	assoluti
media errore [%]	0.56%	1.77%	0.75%	2.87%
dev. Std. errore [%]	2.25%	1.46%	3.38%	1.91%

Gli errori ottenuti sono nel caso peggiore dell'ordine del 3 %, si può quindi affermare che questa verifica sia andata a buon fine.

#### 5.4.2 Riproduzione della distribuzione

Un'altra importante proprietà del disaggregatore è la riproduzione della distribuzione dei dati osservati. In figura 5.10 è riportata la funzione di ripartizione calcolata sia per i dati osservati che per i dati disaggregati. Tale funzione indica in ordinata la probabilità che il corrispondente valore di precipitazione venga superato. I valori massimi hanno dunque minore probabilità di essere superati, sino ad arrivare al valore di altezza di pioggia di 0.0 mm che ha probabilità di superamento prossima all'unità. Nel grafico è stato posto come valore minimo di altezza di pioggia 0.1 mm, al di sotto del quale l'informazione non ha rilevanza.

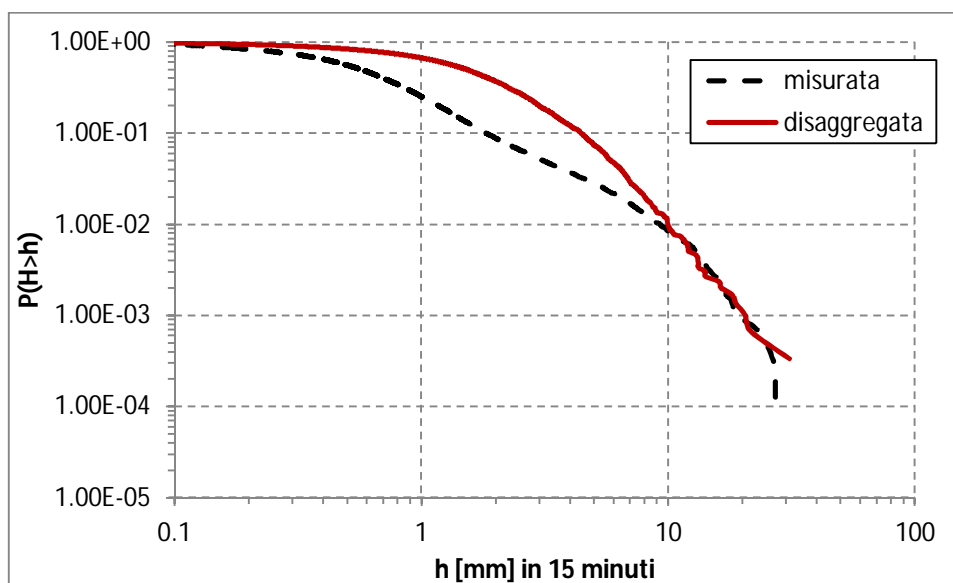


Figura 5.10: funzione di ripartizione della serie misurata e disaggregata.

La riproduzione risulta abbastanza buona: nella parte centrale si osserva una leggera differenza ma se si considera che la scala è logaritmica la discrepanza è più che accettabile. Probabilmente questo scostamento è dovuto alla difficoltà a riprodurre i massimi evidenziata all'inizio di questo paragrafo: conservando la massa e non riproducendo perfettamente i massimi si ha un numero maggiore di valori “medi” che vanno a provocare la differenza tra le due curve. Infine per quanto riguarda i valori con minor probabilità di superamento si nota una difficoltà dei dati disaggregati a cogliere la *heavy tail* caratteristica dei dati osservati, come riscontrato anche in Molnar & Burlando (2005) e Liczbar et al., (2010).

Nonostante queste differenze si può affermare che la distribuzione dei dati disaggregati è compatibile con i dati di partenza. Si ricorda che in questo caso non è possibile operare una verifica anche sui dati generati in quanto disponibili solo a scala oraria. Un confronto tra le distribuzioni esposte e quella calcolata sulla serie disaggregata dai dati di cento anni generati avrebbe poco significato in quanto le due distribuzioni sarebbero sicuramente diverse.

In letteratura sono presenti anche altre validazioni, una riguardante il carattere intermittente della precipitazione, che come esposto in precedenza non ha importanza in questo studio, e un secondo di analisi degli estremi. Quest'ultimo non viene preso in considerazione in quanto questo lavoro è rivolto alle caratteristiche medie del campo di pioggia, che è stato dimostrato essere riprodotte adeguatamente dal modello di disaggregazione.

## 5.5 Conclusioni

Nel capitolo precedente si è messo in evidenza come sia più applicabile una stima dei parametri del modello NSRP a partire da dati orari, con conseguente generazione di serie sintetiche con la medesima risoluzione temporale. Partendo dall'inadeguatezza di questo tipo di dato nell'analisi delle vasche di prima pioggia, in questo capitolo si è cercato di utilizzare un modello di disaggregazione stocastica dei dati.

In letteratura sono presenti diversi esempi di modelli di questo tipo, di diversa natura. Per la semplicità di calibrazione e applicazione si è deciso di implementare un modello *canonical random multiplicative cascade (cRMC)*, nella versione proposta da Molnar e Burlando (2005). Una volta stimati i parametri si è operata una validazione del modello



che ha dimostrato la buona riproduzione del campo di pioggia misurato nel processo di disaggregazione.

A questo punto si è potuto disaggregare anche la serie sintetica di 100 anni generata in precedenza, ottenendo così la base di dati che potrà essere direttamente utilizzata per la valutazione del funzionamento delle vasche di prima pioggia.

## Capitolo 6:

# ANALISI AD EVENTO DEL FUNZIONAMENTO DI VASCHE DI PRIMA PIOGGIA

## 6.1 Introduzione

Una volta generata e validata la base di dati di adeguata risoluzione si passa ora al suo impiego finale: la verifica del funzionamento di vasche di prima pioggia. Per questa operazione verranno utilizzate le metodologie e i modelli introdotti nel Capitolo 2. Nei prossimi paragrafi verranno richiamati i modelli impiegati, e i parametri che li caratterizzano. Riprendendo le conclusioni di Arrigoni e Villa, (2009), la tipologia di vasca considerata è quella di cattura, in quanto oltre a essere quella che meglio applica la normativa è anche quella che nel lavoro aveva mostrato le migliori performance.

Le analisi si propongono, seppur con alcune limitazioni, di stimare l'entità dello scarico di inquinanti in recettori idrici a seguito di eventi di pioggia. A seconda del tipo di recapito finale assumono diversa importanza la massa totale di inquinante scaricata o i massimi di concentrazione. In caso lo scarico avvenga in bacini lacustri il parametro più importante è la massa totale: per via dello scarso ricambio idrico i processi di accumulo sono i maggiori responsabili del deterioramento della qualità delle acque, mentre le concentrazioni di picco vengono diluite facilmente, fatta eccezione per l'intorno dello scarico. Al contrario se il recettore è un fiume o un torrente l'accumulo passa in secondo piano mentre i picchi di concentrazione inquinante faticano ad essere diluiti, e sono quindi responsabili del decadimento della qualità. In questo ultimo caso sarebbe importante anche valutare la persistenza della concentrazione massima oltre certi livelli ma, essendo questa caratteristica differente a seconda delle peculiarità del corpo idrico in esame, in questo studio non è presa in considerazione.

Le analisi vengono eseguite all'occorrenza di un evento di precipitazione, e sono per questo discontinue nel tempo, l'impostazione esposta in seguito riprende i procedimenti

utilizzati nel lavoro di tesi di Arrigoni e Villa (2009). Si è utilizzata la serie di dati sintetica disaggregata alla risoluzione temporale di 15 minuti, in particolare sono stati estratti gli anni con altezza totale massima, minima e media, per investigare oltre al funzionamento medio delle vasche anche quello agli estremi.

## **6.2 Modelli e scelte di calcolo utilizzate**

L'obiettivo delle analisi di funzionamento è stimare la massa totale e le concentrazioni di inquinante in uscita dalle vasche. La base di partenza sono dati di pioggia, con i quali si applica un modello semplificato afflussi deflussi per stimare l'idrogramma alla sezione di chiusura del bacino in esame, dove si ipotizza installata la vasca.

Il bacino (ideale) preso in considerazione ha un estensione pari a 1 ha (10 000 m<sup>2</sup>), dato che si sta trattando di bacini urbani la superficie è considerata impermeabile.

La simulazione idrologica è affiancata dalla simulazione del processo di accumulo e dilavamento degli inquinanti sulla superficie del bacino. I modelli utilizzati sono gli stessi esposti nel Capitolo 2, che nel seguito verranno richiamati con i relativi parametri utilizzati.

### **6.2.1 Precipitazione**

La precipitazione è disponibile in dati di altezza di pioggia con risoluzione temporale pari a 15 minuti. Per un suo utilizzo nei successivi modelli si devono trasformare i valori in intensità (mm/h), viene quindi moltiplicato il valore di altezza per un fattore di scala pari a 4. A causa delle ridotte dimensioni del bacino in esame si considera che tutta la precipitazione cada uniformemente sull'intera area. La suddivisione degli eventi è svolta sulla base delle prescrizioni della normativa della regione Lombardia, che considera due eventi distinti se separati da almeno quattro giorni di periodo secco.

### **6.2.2 Idrogramma di piena**

Per la trasformazione afflussi deflussi si è deciso utilizzare il modello della corrivazione, che considera prevalenti i fenomeni di scorrimento rispetto a quelli di accumulo lungo il bacino, ed è quindi indicato per bacini urbani. Per la determinazione della portata si ipotizza pari a uno il coefficiente di afflusso: questa ipotesi è molto cautelativa, ma se si considera, oltre alle ipotesi di impermeabilità dell'intero bacino, la generalità dello studio, risulta comunque accettabile. Per la formazione dell'idrogramma si utilizza una curva aree

tempi lineare. I tempi di corrivazione adottati per le simulazioni sono stati pari a 15 e 60 minuti.

### 6.2.3 Processo di accumulo

La simulazione del processo di accumulo di materiale sul bacino è ottenuta con il modello di Huber e Dickinson (1988), introdotto nel Capitolo 2. I valori dei parametri che lo definiscono sono stati tratti dallo studio di Arrigoni e Villa (2009).

$$M_a(t) = \frac{Acc}{Disp} (1 - e^{-Disp t_s}) = \frac{6}{0.2} (1 - e^{-0.2 t_s}) \quad (6.1)$$

Dove  $t_s$  rappresenta l'intervallo secco. Per le analisi ad evento si considera il valore iniziale di materiale accumulato pari al massimo possibile,  $\frac{6}{0.2} = 30$  kg, e durante l'evento si considerano nulli i processi di accumulo.

### 6.2.4 Processo di dilavamento

Il modello di dilavamento per questo lavoro è l'SWMM (Huber 1986), introdotto in precedenza, con i seguenti parametri.

$$\begin{aligned} M_d(t + \Delta t) - M_d(t) &= M_a(t) (1 - \exp(-Arra i(t)^{wash} \Delta t)) \\ &= 30(1 - \exp(-0.00057 i(t)^3 \Delta t)) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Che restituisce la massa dilavata nell'intervallo  $t + \Delta t$  in funzione dell'intensità di pioggia  $i(t)$  e del passo temporale adottato  $\Delta t$ , in questo caso assunto pari alla risoluzione dei dati di pioggia: 15 minuti.

## 6.3 Descrizione eventi di precipitazione

Il primo passo per le analisi è dunque l'estrazione degli eventi di pioggia dalla base di dati in esame. I risultati delle estrazioni sono riportati in tabella 6.1, accanto a ogni evento individuato è sono riportate alcune informazioni che lo descrivono quali durata, altezza di pioggia cumulata e intensità massima. L'anno medio presenta quindi un totale di 21 eventi, il minimo 29 mentre l'anno massimo 24.

Tabella 6.1: riassunto del numero e delle caratteristiche degli eventi estratti dagli anni in esame

anno 12 (medio)				anno 10 (min)				anno 81 (max)			
evento	durata [h]	altezza totale [mm]	intensità max [mm/h]	evento	durata [h]	altezza totale [mm]	intensità max [mm/h]	evento	durata [h]	altezza totale [mm]	intensità max [mm/h]
1	11	1.4	0.9	1	24	25.6	5.5	1	120	85.6	11.8
2	123	53.4	8.7	2	84	14.6	4.8	2	180	32.6	4.2
3	131	24.6	4.2	3	21	29.1	5.0	3	18	18.8	7.6
4	318	115.6	17.7	4	8	11.1	6.2	4	54	27.9	9.1
5	126	47.4	7.3	5	49	15.4	5.4	5	188	73.7	7.1
6	52	21.1	5.2	6	93	26.8	13.3	6	250	63.5	8.3
7	444	87.4	12.2	7	480	86.1	13.4	7	7	2.0	1.3
8	176	31.5	9.4	8	11	11.8	7.2	8	7	10.3	4.2
9	998	128.5	35.2	9	69	6.7	3.1	9	236	60.5	17.7
10	34	1.1	0.7	10	111	6.8	3.1	10	13	15.7	5.0
11	20	6.3	6.1	11	631	107.1	26.9	11	1189	249.6	14.9
12	1	0.3	0.5	12	388	32.0	10.6	12	76	20.1	24.3
13	36	12.8	16.7	13	1	3.5	2.4	13	15	30.9	16.6
14	1	7.4	11.7	14	1	0.6	0.8	14	297	93.2	63.7
15	1096	187.5	76.4	15	1	0.1	0.1	15	338	76.2	58.1
16	316	80.0	21.4	16	78	7.4	8.7	16	322	65.3	21.1
17	33	25.3	11.5	17	310	14.6	4.3	17	98	34.9	14.3
18	168	56.9	5.7	18	2	3.0	3.6	18	876	368.0	33.6
19	109	22.1	5.1	19	208	45.6	15.4	19	10	10.1	4.1
20	33	15.1	4.3	20	69	10.5	12.1	20	107	60.8	16.1
21	15	29.7	9.1	21	1	0.3	0.4	21	36	6.6	2.2
totale		955.1		22	369	26.4	10.6	22	8	7.6	2.9
				23	109	7.5	1.7	23	5	2.4	2.0
				24	5	20.9	14.5	24	51	13.5	2.7
				25	11	11.9	5.9	totale 1429.9			
				26	21	5.4	3.1				
				27	424	60.3	10.0				
				28	12	9.1	4.5				
				29	11	11.7	4.5				
				totale		611.9					

La variabilità del numero di eventi annui è imputabile a due ragioni: in primo luogo nell'anno con altezza di pioggia minima la precipitazione risulta particolarmente frazionata e di minore entità rispetto agli altri casi: a conferma di questo basta notare che l'altezza cumulata massima di un evento dell'anno minimo è pari a 107.1 mm in circa 600 ore (evento 11), mentre per l'anno medio un valore simile lo si riscontra per durate di molto inferiori (115.6 mm in 318 ore, evento 4). Inoltre se si analizzano le durate degli eventi si nota come esistano numerosi casi in cui la precipitazione avviene per una sola ora, a causa della natura sintetica della serie di dati disponibile. Come descritto nel Capitolo 4 nella

serie misurata una basculata, pari 0.2 mm di precipitazione, isolata per più di un ora nel periodo antecedente e successivo alla sua occorrenza veniva scartata. In questo caso invece generando in modo sintetico i dati non si opera un filtro su dati grezzi ma si prende la serie così come viene generata, le altezze relative a questi eventi sono comunque esigue, e non ricoprono importanza ai fini della valutazione globale del funzionamento delle vasche.

#### 6.4 Confronto con analisi su eventi reali

Prima di procedere con l'esposizione delle analisi per i tre anni in esame si è voluta operare un'ultima verifica sulla possibilità di utilizzo delle serie sintetiche in questo studio. Per questo motivo si sono confrontati comportamenti di eventi reali e sintetici con caratteristiche simili. Dato l'elevato numero di eventi sintetici in esame si è deciso di selezionare due coppie di eventi rappresentativi che descrivano in un caso un evento convettivo, mentre nell'altro un evento frontale (o stratiforme). La discriminante per la scelta dei due tipi di evento è stata dunque l'intensità massima di pioggia durante l'evento. I massimi di questo valore descrivono infatti un evento convettivo, mentre i valori medio bassi descrivono al contrario un evento stratiforme.

Una volta fissati due eventi con intensità simile si confronta l'altezza cumulata associata, in modo da individuare le precipitazioni più somiglianti. Teoricamente per avere degli eventi dello stesso tipo si dovrebbero confrontare anche le durate, anche se non è stato possibile individuarne di realmente confrontabili per la variabilità di questi tre parametri. Di seguito vengono riportati i grafici estratti con le elaborazioni di dati reali e sintetici.

I primi esempi riportati sono relativi a eventi convettivi: in questo tipo di eventi si ha il picco di precipitazione, e per il modello afflussi deflussi utilizzato anche di portata, nei primi istanti, con un calo successivo. All'interno dei grafici sono riportati gli idrogrammi con i relativi pollutogrammi, cioè le funzioni che descrivono la concentrazione di inquinante a una sezione di chiusura nel tempo. Per quanto riguarda l'evento reale si è preso in considerazione il sesto evento relativo all'anno 1977 di misura. L'evento sintetico invece è estratto dall'anno 81 di simulazione, ed è il numero 1. Nella tabella successiva si riportano le caratteristiche dei due eventi.

**Tabella 6.2: caratteristiche degli eventi convettivi a confronto**

	durata [h]	altezza totale [mm]	intensità max [mm/h]
evento reale	129	79.4	11.6
evento sintetico	120	85.6	11.8

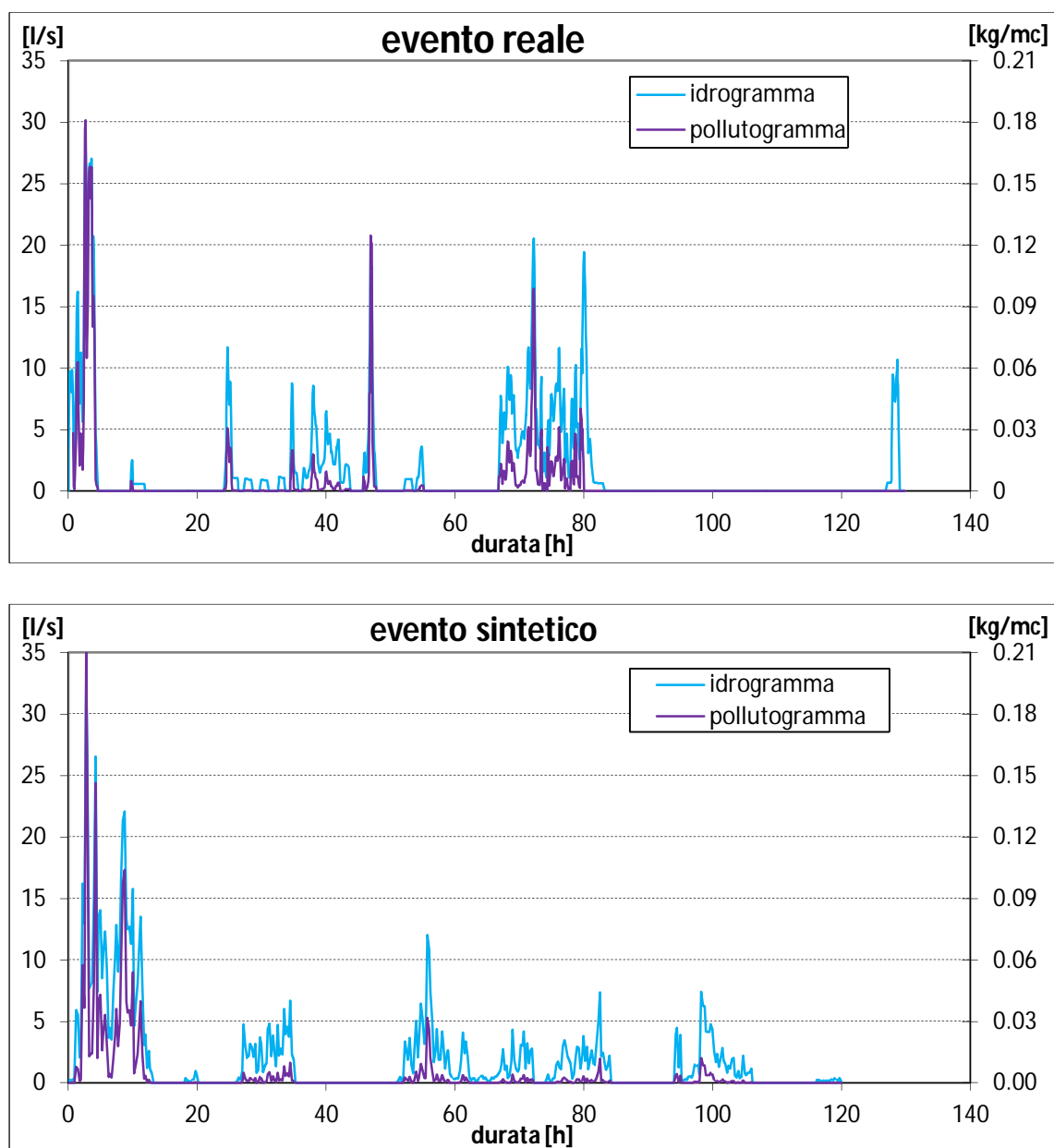


Figura 6.1: confronto tra idrogrammi e pollutogrammi relativi a un evento convettivo reale (sopra), e un evento sintetico (sotto).

Il confronto tra i due eventi, seppur con differenze quantitative, sembra essere coerente, sia in termini di idrogramma che di pollutogramma. Per questo tipo di eventi è quindi verificata l'applicabilità delle serie sintetiche in questo tipo di studi. Dalla figura 6.1 si può riscontrare anche una caratteristica importante delle analisi con serie continue di pioggia: soprattutto per gli eventi convettivi dovrebbe essere marcato il fenomeno di first flush, che consiste in un dilavamento completo e intenso del materiale accumulato sul bacino nei primi istanti di pioggia. Questo fenomeno si traduce in un pollutogramma con un sensibile picco a inizio evento e un successivo azzeramento delle concentrazioni scaricate. L'occorrenza di tale fenomeno è alla base delle prescrizioni normative sul

dimensionamento delle vasche di prima pioggia, risulta per questo molto importante e verrà ripreso nel seguito di questo capitolo.

Il secondo confronto è rivolto a verificare che anche in caso di eventi frontali il comportamento idrologico e l'entità degli scarichi inquinanti sia adeguatamente riprodotto. Per questo confronto si sono utilizzati l'evento 7 dell'anno 1973 di misurazione e l'evento 5 dell'anno generato 81.

Tabella 6.3: : caratteristiche degli eventi frontali a confronto

	durata [h]	altezza totale [mm]	intensità max [mm/h]
evento reale	52	36.3	7.8
evento sintetico	126	47.4	7.3

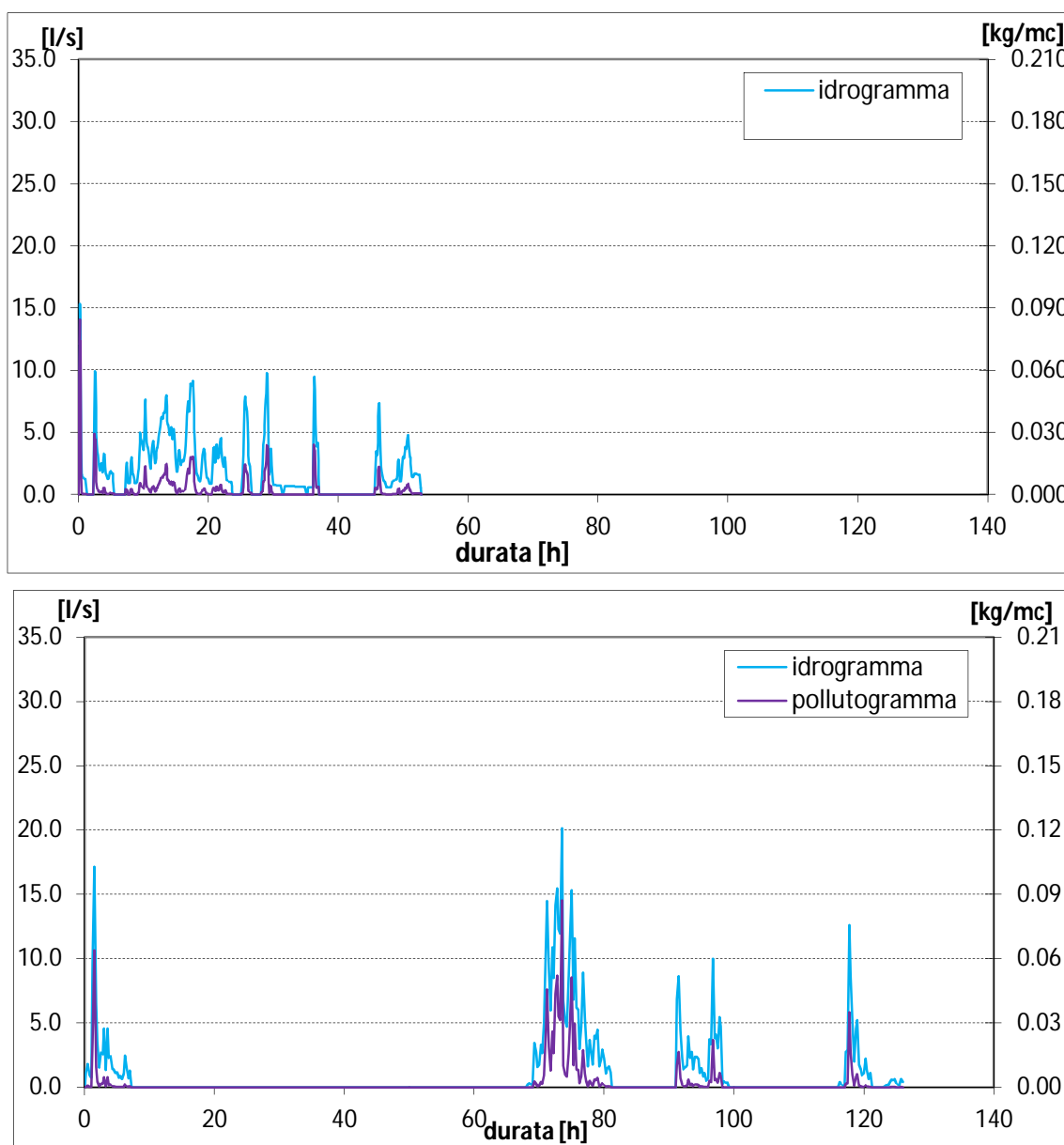


Figura 6.2: : confronto tra idrogrammi e pollutogrammi relativi a un evento frontale reale (sopra), e un evento sintetico (sotto).



Anche in questo caso le i due risultati sono del tutto confrontabili, ed è quindi verificata l'applicabilità delle serie sintetiche per le analisi. Nei prossimi paragrafi verranno riportati i risultati ottenuti con le analisi dei 74 eventi.

## 6.5 Simulazioni del funzionamento delle vasche di cattura

In questo paragrafo verranno esposti degli esempi significativi per le analisi ad evento operate, seguite da un riassunto generale. Le vasche analizzate sono del modello a cattura, e vengono valutati i manufatti dimensionati per intercettare primi 2,5 e 5 mm di precipitazione, da cui consegue che le vasche hanno volumi pari a 25 e 50 mc. Le analisi sono state eseguite per tempi di corrivazione pari a 15 e 60 minuti, tempi caratteristici di bacini come quello in esame.

### 6.5.1 Valutazione delle concentrazioni scaricate

La prima analisi che si vuole esporre è quella relativa alle concentrazioni scaricate al recettore. Per valutare questo aspetto si è considerato il pollutogramma in ingresso, mettendolo a confronto con quello in uscita dalla vasca. L'andamento tipico di questa grandezza è pari a zero sino a che il volume cumulato in vasca è minore al suo volume totale, mentre è pari al pollutogramma in ingresso una volta riempita la vasca.

Si riportano ora degli esempi di funzionamento delle vasche tratti dall'analisi degli eventi di precipitazione. Il caso riportato è relativo all'evento 11 dell'anno generato numero 12, e risulta indicativo per una prima indicazione sul funzionamento. Pur essendo un evento di scarsa entità, sia in termini di intensità massima (6.13 mm/h) che per volume totale (63 m<sup>3</sup>) si nota la diversità di comportamento di vasche dimensionate per intercettare 2.5 mm di acqua rispetto alle altre.

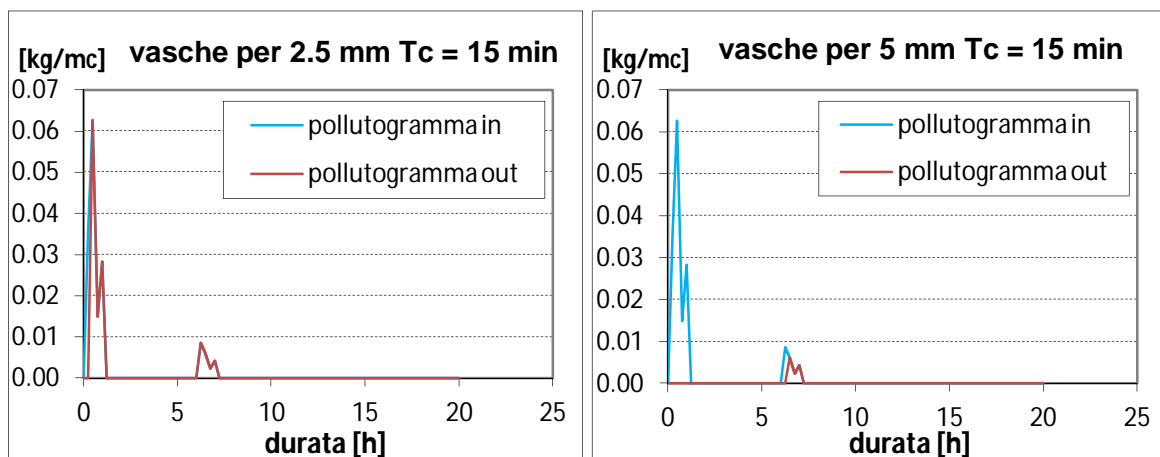


Figura 6.3: pollutogramma in e out alla vasca nel caso di dimensionamento per 2.5 e 5 mm. Evento 11 dell'anno 12.

Nel primo caso infatti la vasca risulta riempirsi nei primi minuti di precipitazione, portando a una differenza praticamente nulla tra pollutogramma in ingresso e in uscita, tanto da risultare praticamente trasparente. Al contrario la vasca da 50 m<sup>3</sup> sembra intercettare bene i massimi di concentrazione, almeno per questo tipo di eventi.

Si vuole valutare ora come varia il funzionamento di questo ultimo tipo di vasche al crescere delle dimensioni dell'evento, sia in termini di durata che di volume totale<sup>1</sup>.

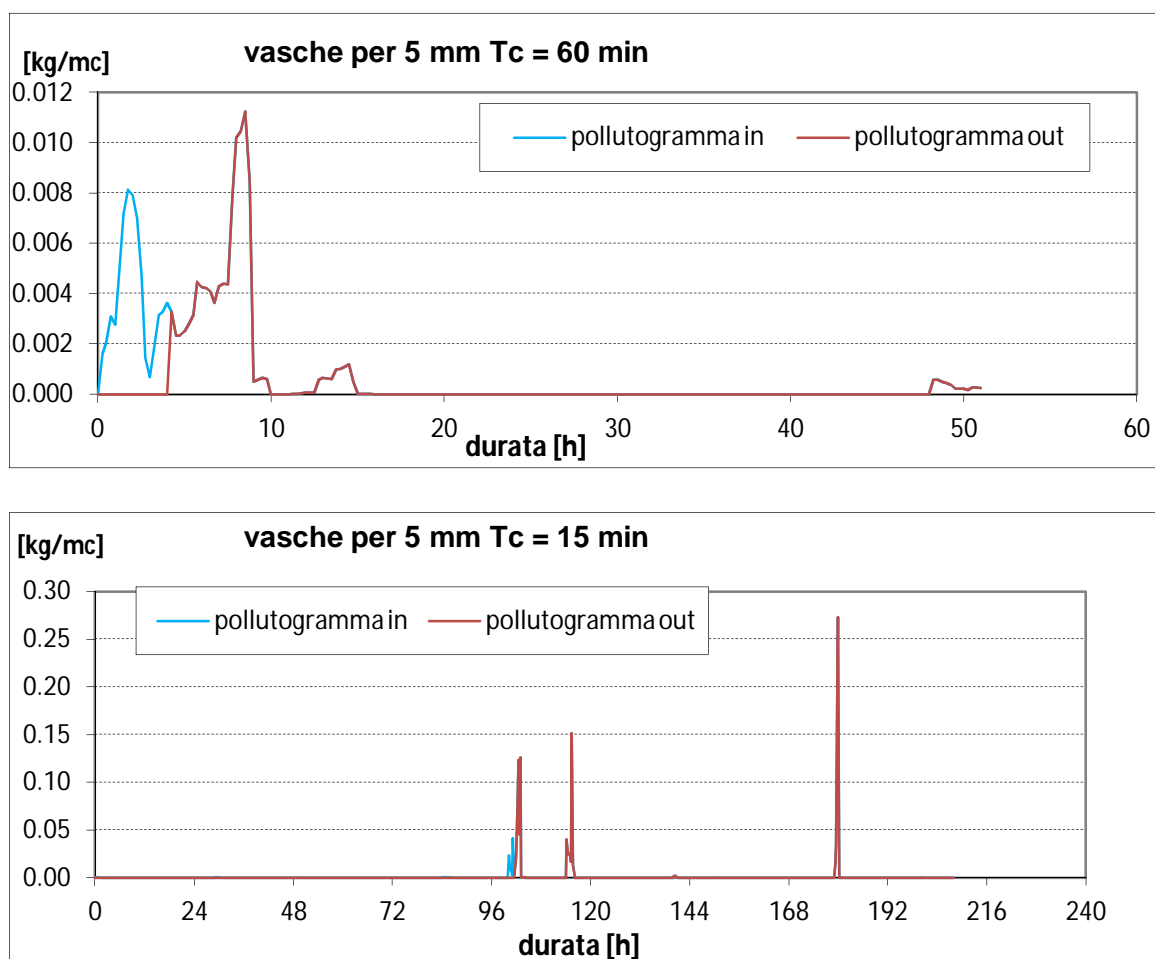


Figura 6.4: pollutogramma in e out alla vasca per 5 mm di precipitazione. in alto evento 24 anno 81, in basso evento 19 anno 10.

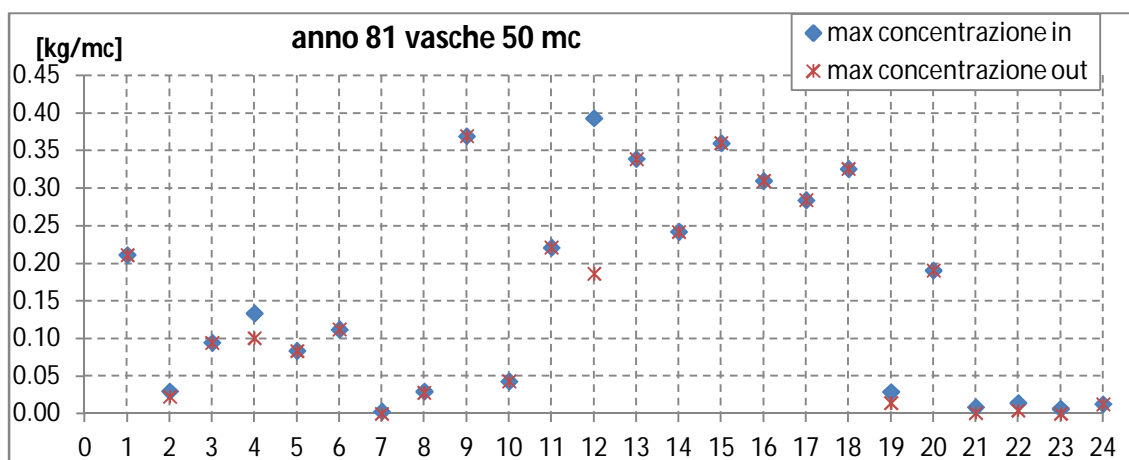
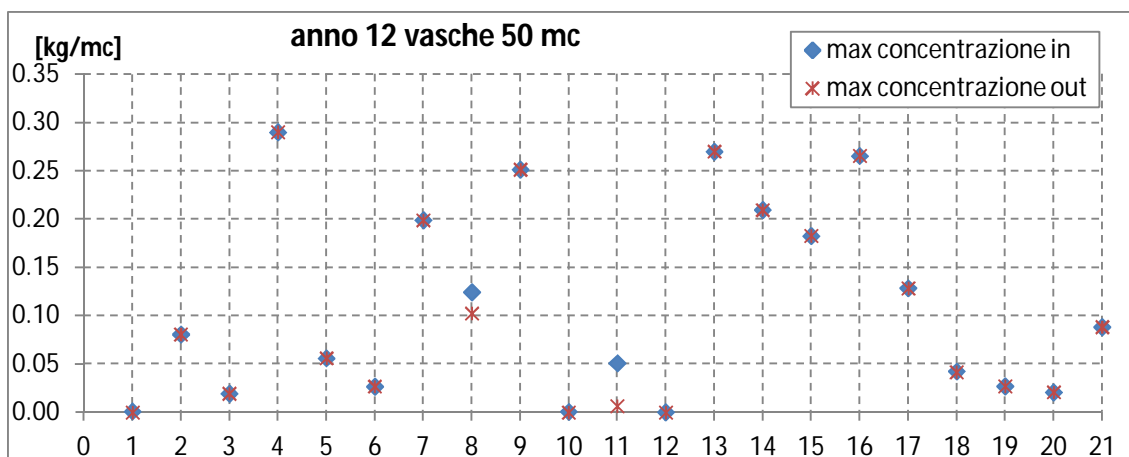
La figura 6.4 mette in evidenza come al crescere della durata l'effetto della vasca diminuisca decisamente. Nel caso dell'evento 19 dell'anno 10 si riscontra lo stesso comportamento del primo grafico riportato, con vasca praticamente trasparente.

Questo comportamento è un ulteriore conferma della mancata occorrenza del first flush, che dovrebbe posizionare il picco massimo di concentrazione nei primi istanti di precipitazione, aspetto che viene confutato negli esempi di figura 6.4. viene così a cadere

<sup>1</sup> Per un'analisi completa di tutti gli eventi nelle varie combinazioni di parametri si rimanda all'appendice D, dove sono riportati i grafici riassuntivi relativi alle concentrazioni

una delle ipotesi alla base delle prescrizioni per il dimensionamento di questi manufatti. Non si afferma che il fenomeno non occorra in nessun caso, ma si è verificato che sulla base degli eventi analizzati tale fenomeno sussista in una percentuale molto bassa dei casi<sup>2</sup>.

Per concludere il paragrafo si riportano dei confronti tra i massimi di concentrazione in ingresso e in uscita per ogni evento, in modo da valutare l'abbattimento di questo valore che le vasche riescono a indurre. I grafici riportati si riferiscono alla combinazione di parametri con soluzione migliore: vasche per 5 mm di pioggia e tempo di corrivazione pari a 15 minuti. Dalla figura si nota come si abbia una diminuzione apprezzabile della concentrazione massima scaricata solo per una decina di eventi, su un totale di 74. Si può quindi concludere che per questo aspetto le analisi hanno messo in mostra come le vasche dimensionate con il criterio di intercettare i primi millimetri di precipitazione non diano una sensibile riduzione delle concentrazioni scaricate.



<sup>2</sup> Per una verifica si rimanda all'Appendice B dove sono riportati tutti i grafici contenenti idrogrammi e pollutogrammi analizzati degli eventi analizzati.

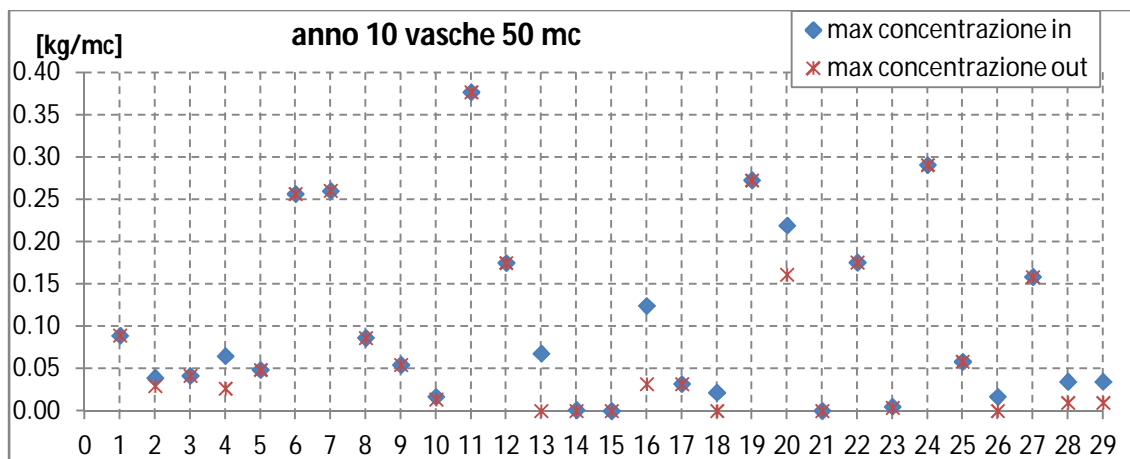
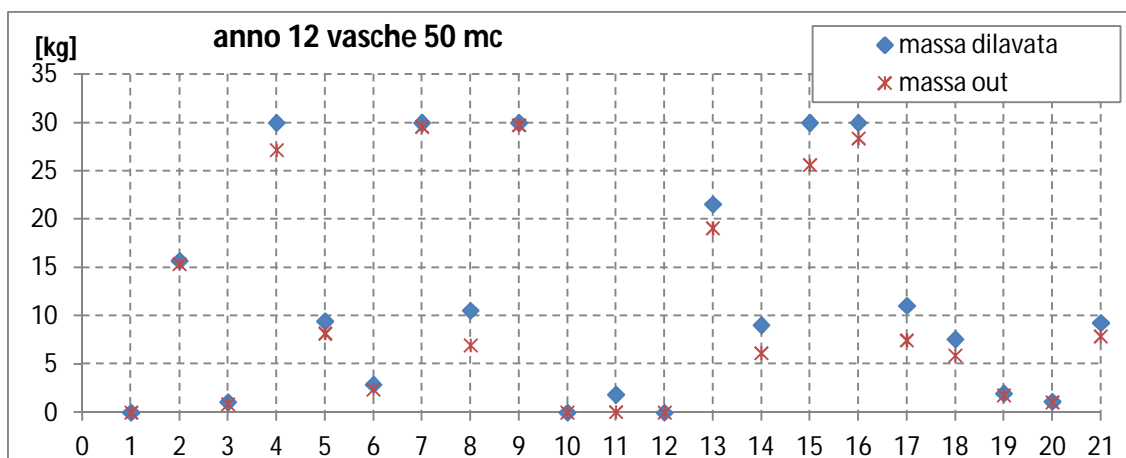


Figura 6.5: confronto tra massime concentrazioni in ingresso e uscita alle vasche, valutate per tutti gli eventi estratti.

### 6.5.2 Valutazione delle concentrazioni scaricate

In questo tipo di analisi l'obiettivo è di stimare la massa totale intercettata dalle vasche, in rapporto con quella in ingresso. Il valore ricercato è in questo caso il totale per ogni evento, per questo non si sono costruite delle curve delle masse scaricate nel tempo ma solo i confronti tra le cumulate per ogni evento.

A differenza del caso precedente per questo parametro non è emerso una coppia di parametri dimensione vasca tempo di corrivazione decisamente migliore delle altre, anche se sono risultate leggermente più performanti le vasche da 50 m<sup>3</sup>, per tempi di corrivazione pari a 60 minuti<sup>3</sup>. Di seguito vengono riportati dei grafici analoghi a quelli presenti in figura 6.5, relativi alle masse. Si ricorda che il massimo valore di massa in ingresso alle vasche è pari a 30 kg, in corrispondenza dei casi in cui tutta la massa presente sul bacino viene dilavata.



<sup>3</sup> Per un'analisi completa di tutti gli eventi nelle varie combinazioni di parametri si rimanda all'appendice C, dove sono riportati i grafici riassuntivi relativi alle masse.

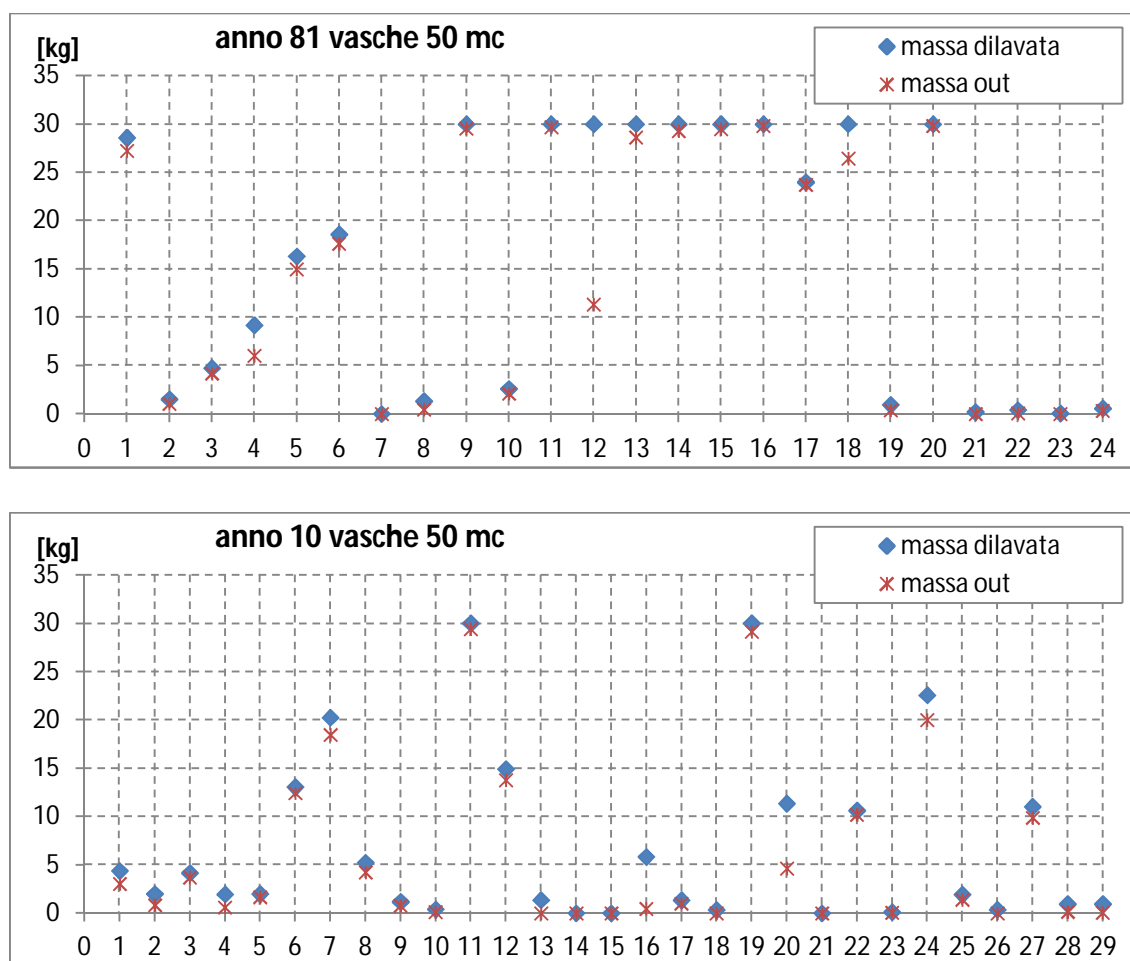


Figura 6.6 confronto tra masse dilavate e masse in uscita dalle vasche, valutate per tutti gli eventi estratti

Anche in questo caso l’apporto delle vasche non è decisivo, infatti si nota una sensibile riduzione della massa scaricata solamente in tre casi: l’evento 12 dell’anno 81, e gli eventi 16 e 20 dell’anno 10 si ha una massa scaricata inferiore alla metà di quella dilavata. Se a questa osservazione si aggiunge che per gli eventi dell’anno 10 hanno una massa totale dilavata di circa 6 e 11 kg, la riduzione globale non sembra essere decisiva. Per verificare quantitativamente questo aspetto si sono valutate le masse totali dilavate e scaricate ai recettori, calcolate in base agli eventi estratti per ogni anno in esame.

Tabella 6.4: masse dilavate e scaricate per gli eventi degli anni in esame.

	massa dilavata [kg]	Masse scaricate			
		Tc = 15 min		Tc = 60 min	
		vasca 2.5 mm [kg]	vasca 5 mm [kg]	vasca 2.5 mm [kg]	vasca 5 mm [kg]
anno 12	253.3	249.4	223.8	243.6	219.2
anno 81	379.1	375.9	342.2	368.7	338.4
anno 10	198.2	189.9	165.9	187.1	164.9

Dalla tabella 6.4 non si riscontra come le vasche di cattura per 5 mm di precipitazione valutate con tempi di corrvazione di 60 minuti abbiano le prestazioni migliori, anche se la

rimozione si attesta nell'ordine della decina di punti percentuali. Anche per questo aspetto le vasche dimensionate in base alla rimozione dei primi millimetri di pioggia non sembrano essere efficaci.

### 6.5.3 Calcolo delle efficienze

Un modo differente e più conciso per la valutazione delle prestazioni delle vasche è il calcolo delle efficienze di rimozione, sia per le concentrazioni massime che per le masse scaricate. Nel primo caso si valuta la riduzione del picco di concentrazione in ingresso, mentre nel secondo si valuta quanta massa viene intercettata e inviata a depurazione. La formulazione dei rendimenti è la seguente.

$$\eta_m = \frac{m_{in} - m_{out}}{m_{in}} \quad (6.3)$$

$$\eta_C = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \quad (6.4)$$

Entrambi gli indici variano da zero a uno, a seconda del livello di rimozione, o riduzione, che la vasca riesce a ottenere. Nel seguito si riportano un grafico e una tabella contenenti rendimenti. Nella tabella 6.5 è riportato un esempio di calcolo delle efficienze per l'anno 12 ( $T_c = 60$  minuti), dalla quale si ha una riconferma di quanto sostenuto nei paragrafi precedenti: se per quanto riguarda le masse si hanno alcuni casi in cui il rendimento delle vasche è buono nella maggior parte dei casi in cui si analizza la concentrazione le vasche risultano totalmente inefficaci. In alcuni eventi i rendimenti risultano pari al valore massimo possibile, ma se si verifica l'effettiva entità di tali eventi si scopre che sono quelli di brevissima durata e con altezze complessive minime, viene quindi confermato quanto detto in precedenza. Per le tabelle relative agli altri anni e ai diversi tempi di corrivazione si rimanda all'Appendice E.

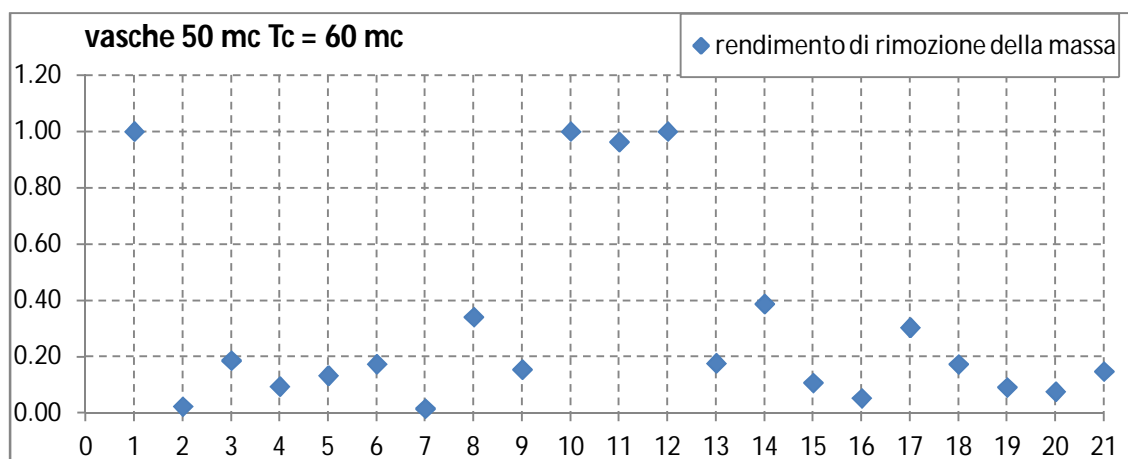


Figura 6.7: rendimenti di rimozione delle masse relative a vasche da 50 mc per eventi dell'anno 12, per  $T_c = 60$  minuti

Tabella 6.5: esempio di calcolo delle efficienze per l'anno 12, e tempo di corrvazione pari a 15 minuti

evento	h [mm]	i max [mm/h]	rendimenti rimozione			
			masse 25 mc	masse 50 mc	concentrazione 25 mc	concentrazione 50 mc
1	1.45	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00
2	53.41	8.71	0.01	0.02	0.00	0.00
3	24.58	4.17	0.06	0.19	0.00	0.00
4	115.59	17.75	0.04	0.09	0.00	0.00
5	47.40	7.26	0.07	0.13	0.00	0.00
6	21.10	5.17	0.03	0.17	0.00	0.00
7	87.39	12.21	0.00	0.02	0.00	0.00
8	31.48	9.41	0.10	0.34	0.00	0.18
9	128.51	35.22	0.01	0.15	0.00	0.00
10	1.05	0.72	1.00	1.00	1.00	1.00
11	6.30	6.11	0.44	0.96	0.19	0.88
12	0.32	0.46	1.00	1.00	1.00	1.00
13	12.84	16.68	0.03	0.18	0.00	0.00
14	7.39	11.74	0.14	0.39	0.00	0.00
15	187.51	76.43	0.02	0.11	0.00	0.00
16	79.99	21.42	0.02	0.05	0.00	0.00
17	25.33	11.45	0.14	0.30	0.00	0.00
18	56.86	5.67	0.06	0.17	0.00	0.02
19	22.08	5.10	0.02	0.09	0.00	0.00
20	15.14	4.30	0.03	0.08	0.00	0.00
21	29.68	9.09	0.01	0.15	0.00	0.00

Dall' analisi a evento è risultato come in ogni caso le vasche dimensionate con lo scopo di intercettare i primi millimetri di precipitazione non risultino efficaci né per la riduzione dei picchi di concentrazione né per la riduzione delle masse di inquinante inviate al recettore. La causa principale di questa difficoltà è imputabile al mancato fenomeno del first flush. Le acque meteoriche dei primi istanti di ogni evento infatti faticano a dilavare completamente il bacino, con il risultato di riempire le vasche con acque poco inquinate e permettere al resto del pollutogramma di essere scaricato nel recettore.

Nel prossimo paragrafo verranno svolte analisi sui risultati in modo da individuare le caratteristiche critiche che contribuiscono al degrado delle prestazioni delle vasche.

## 6.6 Analisi critica dei risultati delle simulazioni

In questo paragrafo si vuole individuare da quali parametri dipenda il peggioramento delle efficienze, in modo da individuare alcuni aspetti critici per questo tipo di modellazione.

Nel paragrafo verranno confrontati i rendimenti in funzione di tre parametri caratteristici dell'evento: l'intensità massima, il volume totale e la durata dell'evento piovoso.

### 6.6.1 Verifica della dipendenza dei rendimenti dall'intensità totale

La prima qualità che si è valutata è la dipendenza dei rendimenti di rimozione dalla massima intensità registrata durante l'evento. Si è scelto di riportare il grafico relativo all'anno 12 per vasche da 50 m<sup>3</sup> e tempo di corrivazione di 60 minuti.

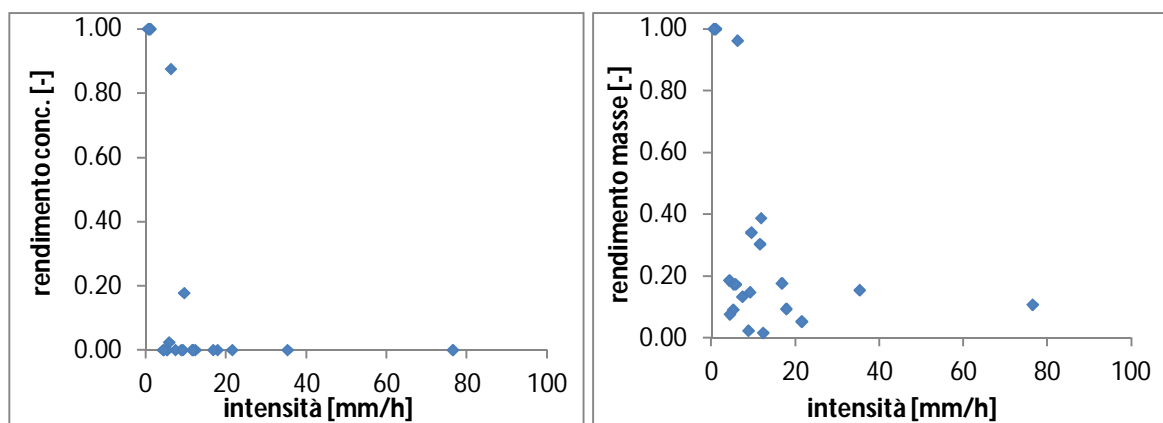


Figura 6.8: dipendenza dei rendimenti dall'intensità massima degli eventi, a sinistra per le concentrazioni, a destra per le masse.

In entrambi i casi si nota come al crescere dell'intensità massima si abbia un progressivo peggioramento dei rendimenti, molto più marcato nel caso delle concentrazioni.

### 6.6.2 Verifica della dipendenza dei rendimenti dal volume totale

Messo in evidenza il riempimento precoce delle vasche di cattura, e la loro conseguente difficoltà ad intercettare una quantità significativa di massa si è voluto mettere in evidenza l'andamento del rendimento in funzione del volume totale dell'evento. I grafici successivi sono relativi agli eventi dell'anno 12, per vasche da 50 m<sup>3</sup> e tempo di corrivazione di 60 minuti.

Il comportamento anche in questo caso vede un degrado molto marcato delle efficienze al crescere del volume, a causa probabilmente del riempimento immediato delle vasche con acque poco inquinate rispetto al resto dell'evento.



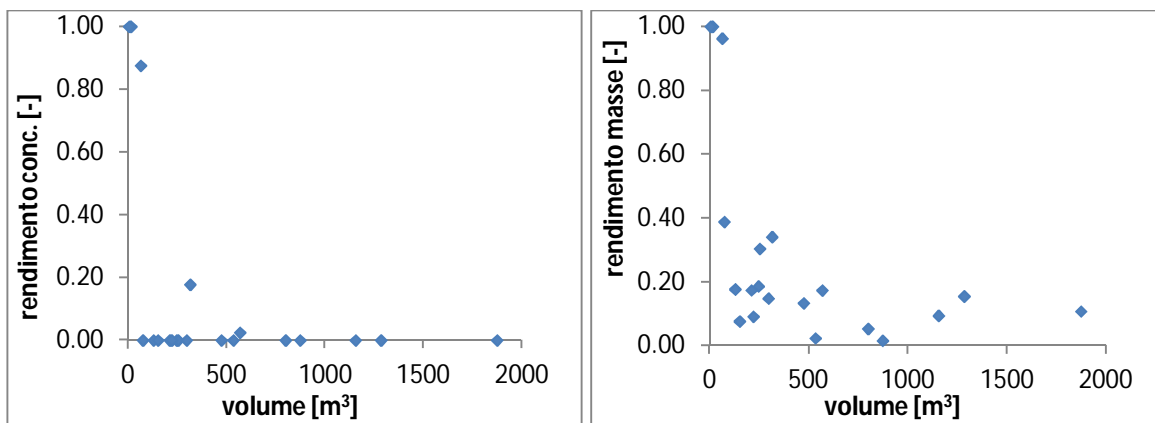


Figura 6.9: dipendenza dei rendimenti dal volume totale degli eventi, a sinistra per le concentrazioni, a destra per le masse.

### 6.6.3 Verifica della dipendenza dei rendimenti dalla durata dell'evento

L'ultima verifica che si vuole operare riguarda la durata dell'evento, per mettere in evidenza come per eventi molto prolungato le efficienze decadano molto velocemente. Anche in questo caso si sono analizzate vasche da 50 m<sup>3</sup> e tempo di corrivazione pari a 60 minuti per l'anno 12.

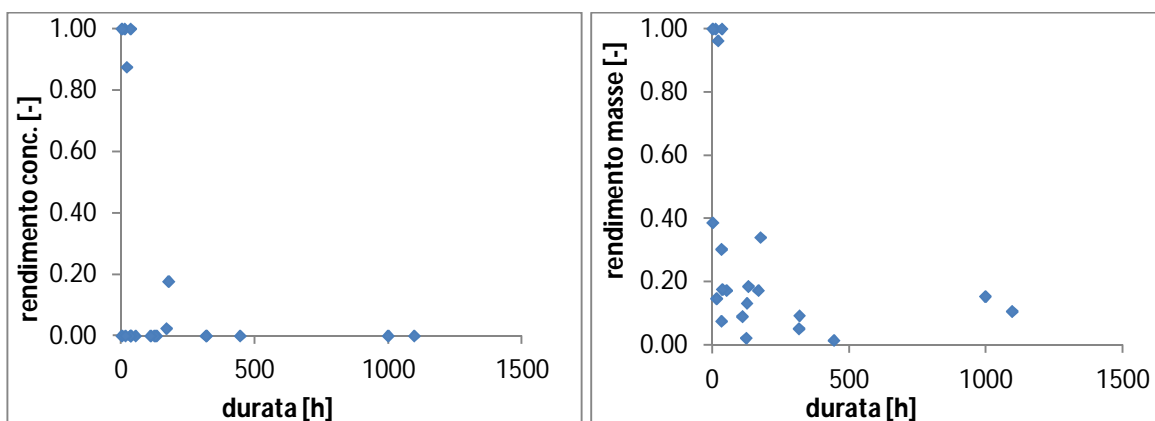


Figura 6.10: dipendenza dei rendimenti dalla durata totale degli eventi, a sinistra per le concentrazioni, a destra per le masse.

Il comportamento è anche in questo caso confermato, complessivamente la concentrazione di picco risente in modo maggiore della durata. All'aumentare di questo parametro infatti si riduce la possibilità che il picco di concentrazione in ingresso sia nei primissimi istanti dell'evento nei quali la vasca riesce ad intercettare il pollutogramma.

Si è dunque verificato come all'aumentare di tutti i parametri presi in considerazione si abbia un peggioramento delle efficienze delle vasche di prima pioggia, che risulta più

marcato nel caso di rendimenti sulla riduzione del picco di concentrazione in uscita verso il recettore.

## 6.6 Conclusioni

In questo capitolo si sono espone le metodologie e i risultati delle analisi per la verifica del funzionamento di vasche di prima pioggia dimensionate per intercettare i primi millimetri di precipitazione (2.5 o 5 mm).

Nella prima parte si è verificata con successo l'applicabilità delle serie sintetiche di pioggia all'analisi delle vasche, confrontando eventi reali e sintetici con caratteristiche simili, sia in caso di eventi convettivi che frontali.

Successivamente si sono riportati alcuni risultati delle simulazioni sui 74 eventi estratti dai tre anni in esame, dai quali si è messa in evidenza l'inadeguatezza da parte dei manufatti così dimensionati sia a ridurre i picchi di concentrazione in uscita che a intercettare masse significative di inquinante. Nell'ultima parte delle analisi si sono valutate le efficienze, per le quali si è cercato di individuare quale caratteristica degli eventi, tra intensità massima, volume totale e durata, fosse più incisivo nel suo degrado. Dai confronti eseguiti è emerso che nessuna di queste caratteristiche influisce più delle altre sul degrado dei rendimenti: al crescere di uno o dell'altro si ha circa il medesimo decadimento delle efficienze.

In conclusione si può concludere che l'analisi ad evento del funzionamento delle vasche di prima pioggia ha messo in evidenza l'inadeguatezza di tali manufatti per gli scopi a cui sono deputati. Nel prossimo capitolo si tenterà un approccio in continuo per approfondire lo studio e valutare eventuali differenze con lo studio a evento.

## Capitolo 7:

# ANALISI CONTINUA DEL FUNZIONAMENTO DI VASCHE DI PRIMA PIOGGIA

## 7.1 Introduzione

In questo capitolo si vuole investigare il funzionamento delle vasche di prima pioggia rimuovendo alcune ipotesi alla base dell'analisi svolta nel capitolo precedente. Questa operazione è possibile grazie alla natura della serie di dati generata: mentre per le serie misurate sono stati digitalizzati solo i dati relativi agli eventi, in questo caso si ha una serie continua per cento anno di dati a 15 minuti.

Osservando i risultati dell'analisi a evento sono emersi due aspetti, correlati tra loro, che hanno portato alla decisione di un approccio continuo. In primo luogo la definizione di evento, basata sulle prescrizioni della normativa, è sembrata in alcuni casi essere inadeguata, tanto da permettere di identificare eventi di precipitazione lunghi oltre un mese. Se a questo aspetto si aggiunge l'ipotesi imposta sul processo di accumulo, cioè un accumulo di materiale pari al massimo possibile a inizio evento, e un accumulo nullo durante l'evento stesso, si mettono in evidenza i principali limiti di questo approccio.

Nel seguito del capitolo verranno mostrati esempi relativi a questi limiti, e verrà esposto il modello continuo utilizzato con i relativi risultati.

## 7.2 Limiti dell'analisi ad evento

Il primo aspetto che si vuole mettere in evidenza è la definizione di evento tratta dalla normativa. La Regione Lombardia infatti impedisce lo svuotamento delle vasche in presenza di precipitazione, inoltre per considerare due eventi distinti è necessario che siano separati da un periodo di quattro giorni. In molti casi si nota infatti che a causa di ore di pioggia "isolate", che però distano poco meno della soglia per la definizione di evento, si

ottengono eventi di lunghezza notevole. In figura 7.1 è riportato uno dei casi più chiari: questo evento, estratto secondo normativa, presenta una lunghezza di circa 46 giorni.

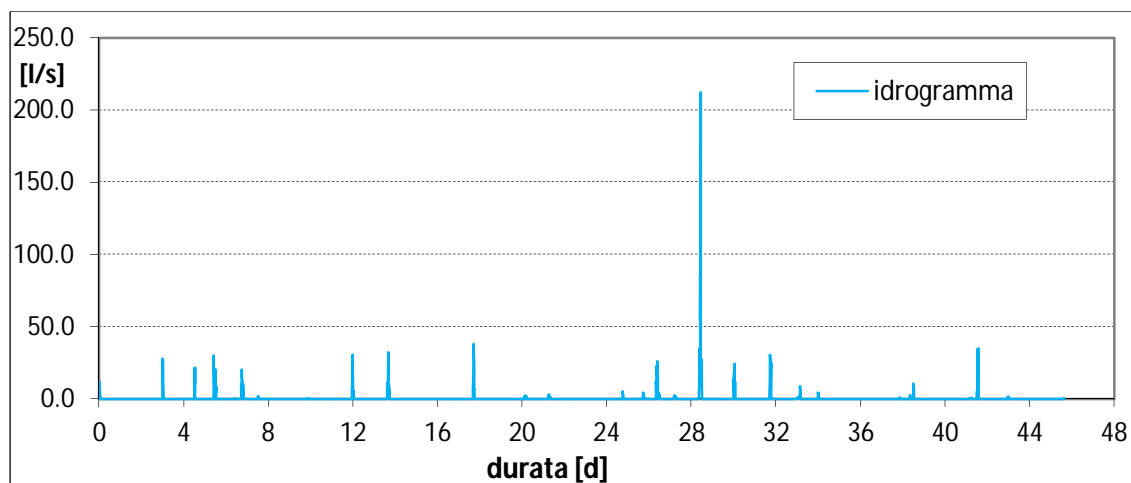


Figura 7.1: esempio di evento di lunga durata estratto dalle serie di dati sintetiche (evento 15, anno 12).

La figura mette in evidenza come esistano numerosi intervalli secchi di dimensioni superiori anche a 2 o addirittura 3 giorni. Da un'osservazione critica si possono individuare almeno quattro sottoeventi significativi all'interno di questo macroevento: da 0 a 8 giorni, da poco meno di 12 a circa 18 giorni, da 24 a 34 giorni e infine dal giorno 38 sino alla fine della serie. Il problema relativo a questo tipo di classificazione non è nel numero totale di eventi, per capire il motivo dell'inadeguatezza di questa classificazione per la modellazione a evento si riporta in figura 7.2 il pollutogramma associato all'idrogramma proposto

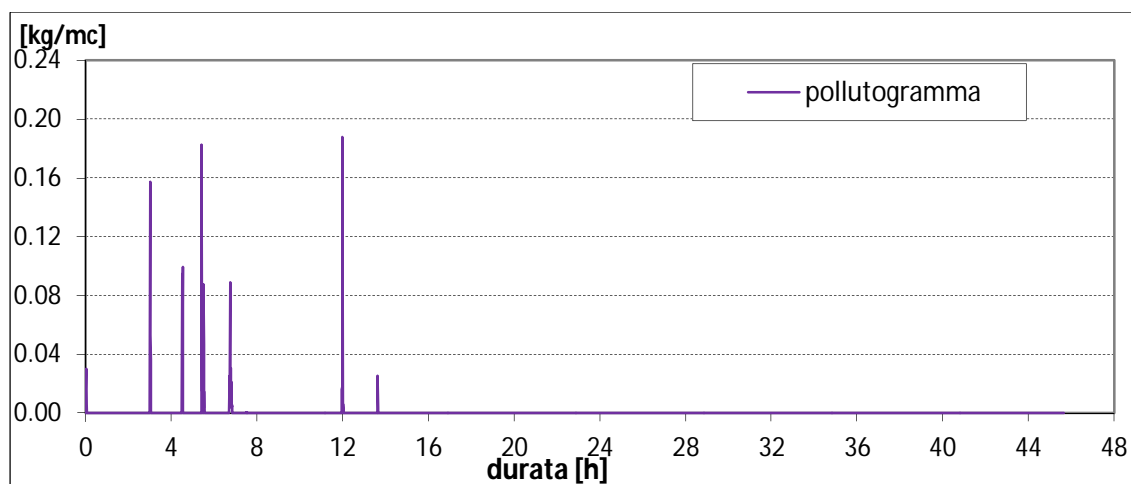


Figura 7.2: pollutogramma associato all'evento 15 dell'anno 12.

La massa viene dilavata completamente nei primi 14 giorni di evento, data l'ipotesi di accumulo nullo durante il singolo evento dall'istante in cui viene dilavata completamente la massa iniziale non si ha più inquinante nell'idrogramma in uscita. Andando a verificare

questa ipotesi con il modello di accumulo adottato si nota come risultati infondata. In figura 7.3 è riportata la curva di accumulo, nella quale è messo in evidenza l'accumulo per un tempo secco minore del tempo interevento minimo. Si nota subito che in questo periodo si ha un accumulo decisamente consistente, pari a circa la metà del valore asintotico finale. Non risulta quindi sempre verificata l'ipotesi fatta per l'analisi ad evento, e per questo motivo si è studiato un approccio continuo al problema, che tenga anche conto dell'evoluzione del processo di accumulo di materiale sulla superficie del bacino.

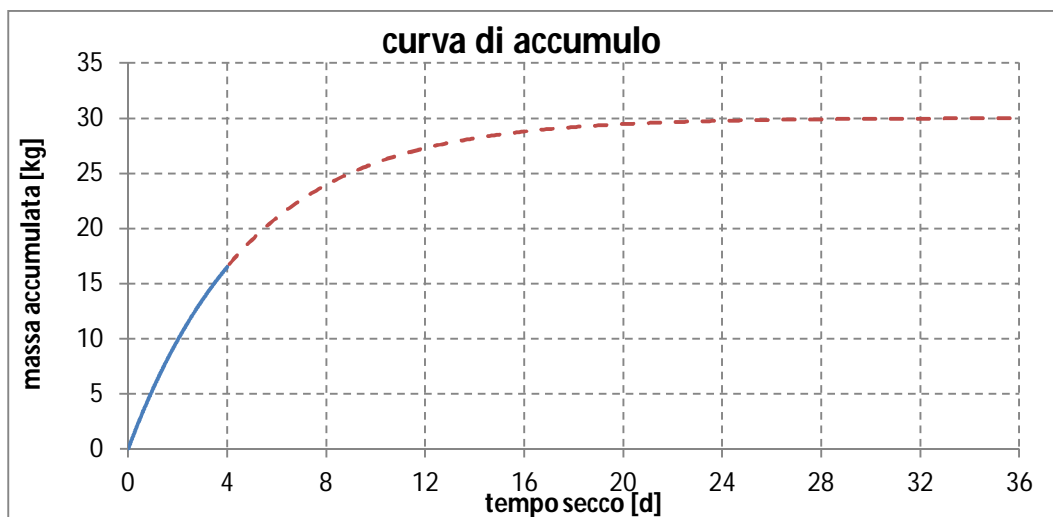


Figura 7.3: curva di accumulo ottenuta con i parametri utilizzati in questo studio.

### 7.3 Modello continuo di accumulo

Il modello di accumulo utilizzato fornisce la massa depositata sul bacino in funzione del tempo secco. In un approccio continuo si devono salvaguardare due aspetti: da un lato se in un evento la massa di inquinante sul bacino a un certo istante risulta completamente dilavata, ma successivamente si hanno dei giorni secchi, è necessario che si possa avere nuovamente accumulo. All'opposto non è detto che se un evento dilava completamente, il successivo abbia comunque una massa depositata pari al valore asintotico: con riferimento alla figura 7.3 si vede che per raggiungere tale valore sono necessari almeno 20 giorni di periodo secco.

Alla luce di queste problematiche il modello di accumulo è stato modificato inserendo un tempo secco equivalente, che tenga conto delle condizioni di deposito precedenti del bacino. La formulazione è ottenuta invertendo la (2.26).

$$t_s = - \frac{\ln\left[1 - \frac{Disp \cdot Ma(t)}{Acc}\right]}{Disp} \quad (7.1)$$

In questo modo all'occorrenza di un istante temporale privo di precipitazione il tempo secco non parte da zero ma dal valore corrispondente al quantitativo di massa ancora depositata sul bacino, all'istante successivo la curva di accumulo riprende effettivamente dal punto corrispondente alla massa già depositata. Nella figura seguente è riportato un esempio dell'andamento dell'accumulo durante un intero anno. La cosa più importante da notare nel grafico è che la funzione si azzerava in pochissime occasioni, a differenza dell'analisi ad evento, per la quale oltre una certa durata difficilmente si otteneva un deposito residuo a fine simulazione. È rilevante anche il mancato raggiungimento del valore asintotico in buona parte dell'anno.

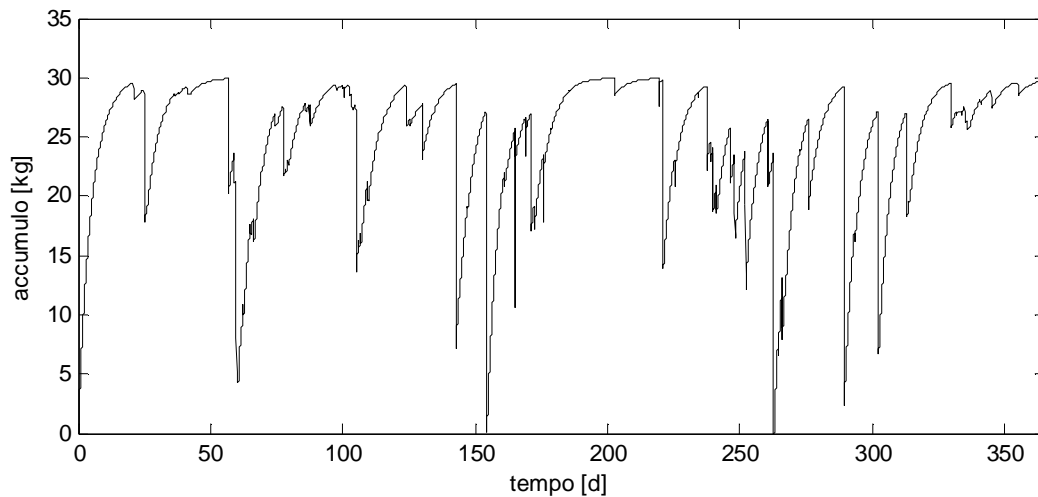


Figura 7.4: andamento del processi di accumulo per l'anno 12, valutato in continuo.

Con questo modello di accumulo si sono eseguite le analisi annuali per gli anni presi in considerazione nel capitolo precedente. Nel prossimo paragrafo verranno messe in evidenza le differenze tra questo approccio e l'analisi ad evento.

## 7.4 Confronto tra approccio continuo e analisi ad evento

Una volta implementato il nuovo metodo si sono verificate le differenze con le analisi del capitolo precedente, sia confrontando la parte relativa alla formazione del pollutogramma, sia valutando la variazione delle prestazioni delle vasche.

### 7.4.1 Confronto tra pollutogrammi

Il primo esempio che si vuole portare è quello già trattato in precedenza relativo all'evento numero 15 dell'anno 12 (figura 7.5). Si riporta di seguito il pollutogramma estratto dalla simulazione continua. Si nota subito la differenza con l'esempio di figura 7.2, in quanto anche dopo il giorno 14 si ha comunque massa disponibile a essere dilavata. Si può anche verificare come a differenza del caso precedente i primi picchi di concentrazione scaricata siano minori rispetto all'analisi ad evento, questo aspetto è imputabile al mancato raggiungimento del valore asintotico di accumulo pre evento.

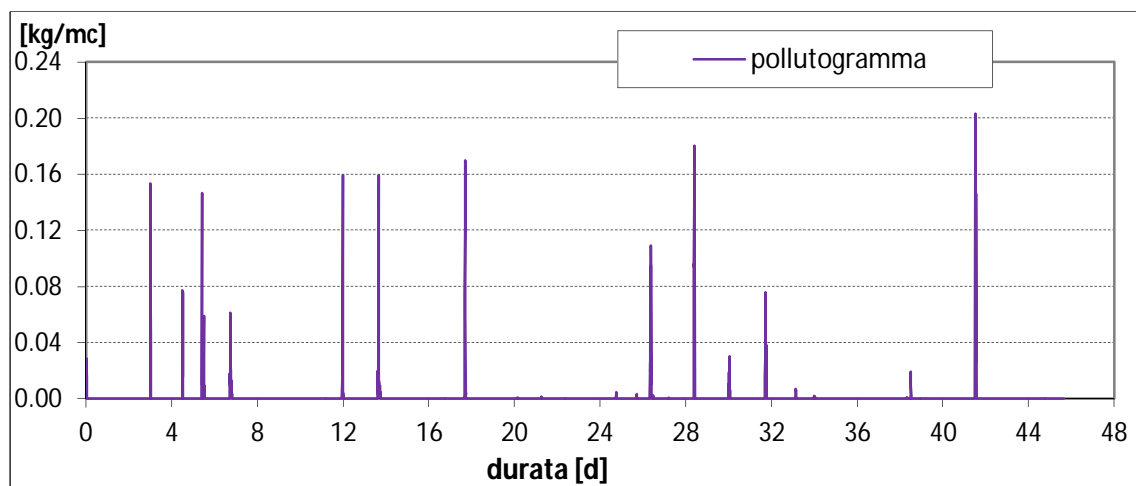


Figura 7.5: : pollutogramma associato all'evento 15 dell'anno 12, ottenuto con modellazione continua del processo di accumulo

L'esempio riportato si riferisce ad un macroevento di lunghezza superiore al mese. Si vuole ora verificare se le differenze di stima del pollutogramma siano significative anche per durate inferiori. Il primo esempio che si riporta è relativo all'evento 16 dell'anno 81 (figura 7.6), per il quale sembrano confermate le osservazioni fatte in precedenza. Anche in questo caso il dilavamento risulta di minor entità nei picchi di concentrazione, ma è prolungato per tutto il periodo per il quale le portate hanno valore significativo. Anche in questo caso l'arco di tempo presente tra il primo picco di portata (e quindi di precipitazione), e la seconda parte dell'evento permette l'accumulo di una buona quantità di inquinante che viene successivamente dilavata.

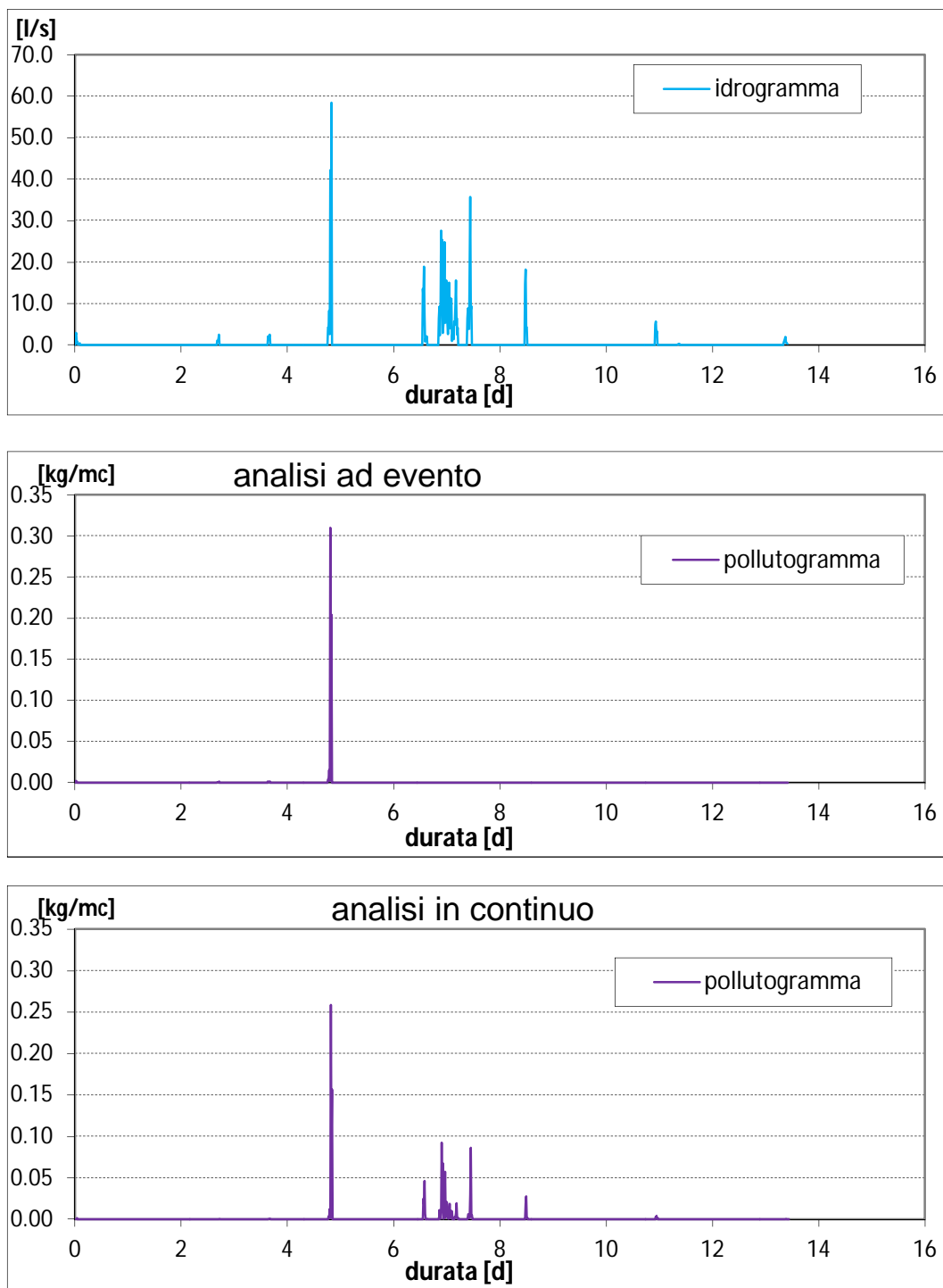


Figura 7.6: confronto di pollutogrammi stimati con i due modelli, relativi all'evento 16 dell'anno 81

Analizzato un evento di durata di una decina di giorni si vuole verificare ora il comportamento per eventi brevi. L'evento riportato è il numero 12 dell'anno 1981, di durata superiore di poco superiore a tre giorni. Anche in questo caso la tendenza è confermata, il pollutogramma ottenuto con l'analisi in continuo presenta un piccolo picco verso la fine dell'evento. La differenza non è marcata come negli esempi di durata



superiore ma comunque conferma e giustifica ulteriormente la scelta di un approccio continuo.

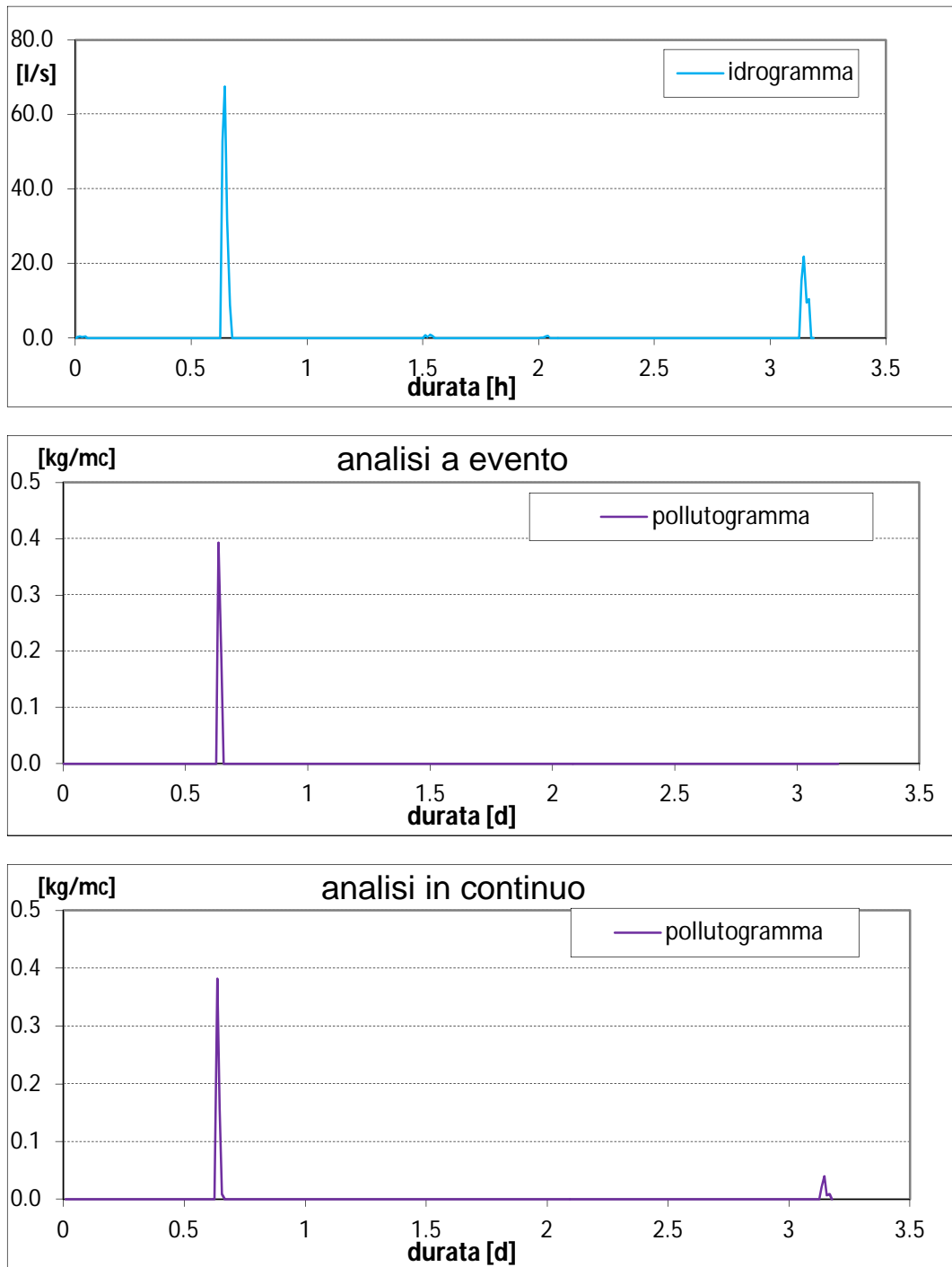


Figura 7.7: confronto di pollutogrammi stimati con i due modelli, relativi all'evento 12 dell'anno 81

#### 7.4.1 Confronto tra efficienze globali

In questo paragrafo si voglio valutare le differenze di prestazione delle vasche valutate nei due modi. Il confronto è calcolato su base annuale, in termini di masse totali dilavate

nelle varie configurazioni. Una valutazione su base annuale della riduzione del picco di concentrazione sarebbe poco rappresentativa, in quanto comunque descriverebbe solo il funzionamento durante l'evento contenente il picco massimo, ed è per questo stata tralasciata.

I risultati riportati si riferiscono a vasche dimensionate per intercettare 5 millimetri di pioggia poichè sono risultate le migliori in quanto a prestazioni. In tabella sono riportate le masse dilavate e le masse scaricate con i relativi rendimenti. I risultati sono complessivamente scadenti, e contrastanti, il miglior rendimento si ha comunque per l'anno con precipitazioni minori, anche se complessivamente la simulazione in continuo mette in evidenza un comportamento peggiore rispetto all'analisi ad evento.

**Tabella 7.1: efficienze globali annuali dei due diversi approcci, per vasche dimensionate per 5 mm di pioggia.**

		modello continuo			modello continuo		
		dilavata	scaricata	rendimento	dilavata	scaricata	rendimento
		[kg]	[kg]	[-]	[kg]	[kg]	[-]
anno 12	Tc=15 min	253.3	223.8	0.13	380.2	352.6	0.08
	Tc=60 min	253.3	219.2	0.16	380.2	333.5	0.14
anno 81	Tc=15 min	379.1	342.2	0.11	508.4	474.1	0.07
	Tc=60 min	379.1	338.4	0.12	508.4	417.3	0.22
anno 10	Tc=15 min	198.2	165.9	0.19	212.1	183.1	0.16
	Tc=60 min	196.2	164.9	0.19	212.1	157.1	0.35

## 7.5 Conclusioni

A partire da alcune osservazioni rispetto ai modelli e alle scelte di calcolo utilizzate nel Capitolo 6 si è deciso di rimuovere alcune ipotesi semplificative per avere una simulazione più precisa del processo di accumulo di inquinante sulla superficie del bacino.

Una volta implementato un modello modificato di accumulo si sono confrontati i risultati relativi all'analisi di alcuni eventi di diversa durata con i due approcci, mostrando che l'approccio in continuo permette di valutare più realisticamente sia l'accumulo che il dilavamento degli inquinanti.

Nell'ultima parte si sono valutati i rendimenti globali di rimozione delle masse riconfermando l'inadeguatezza delle vasche nell'intercettare una frazione considerevole della massa dilavata sul bacino.

## Capitolo 8:

# CONCLUSIONI

### 8.1 Riepilogo degli obiettivi della tesi

Lo studio del funzionamento delle vasche di prima pioggia risulta decisivo per comprenderne la reale efficacia nel migliorare la qualità degli scarichi urbani in corpi idrici recettori. In studi precedenti (Albizzati Mantegazza 2007), è stato dimostrato come il dimensionamento delle vasche prescritto dalla Regione Lombardia, che impone di intercettare i primi millimetri di precipitazione, sia insufficiente. Per questo motivo sono stati ideati metodi per l'analisi di funzionamento delle vasche, allo scopo di individuare quali fossero gli aspetti critici del dimensionamento. Dal lavoro di Arrigoni e Villa (2009) è emerso come l'utilizzo di ietogrammi sintetici (costante e Chicago) non riproduca adeguatamente l'andamento delle masse e delle concentrazioni scaricate in caso di eventi reali.

L'obiettivo principale di questo lavoro è stato proprio quello di studiare un input di precipitazione adeguato per i modelli di funzionamento delle vasche di prima pioggia.

### 8.2 Risultati ottenuti

La scelta per la riproduzione del campo di pioggia nell'area in esame è ricaduta sul modello a processi puntuali Neyman Scott Rectangular Pulse. Il modello riproduce stocasticamente una serie continua di dati pioggia, a una certa scansione temporale. Per le applicazioni in esame sono necessari dati con risoluzione sub oraria. La base di dati di partenza è la serie di dati di pioggia registrati nella stazione di Milano via Monviso digitalizzati con scansione temporale di 5 minuti. Per questi motivi il primo tentativo di calibrazione dei parametri del modello è stato operato con la serie disponibile, anche se i diversi algoritmi di ottimizzazione implementati non hanno portato a risultati

soddisfacenti. La soluzione si è spostata quindi verso una calibrazione del modello, più comunemente utilizzata, con dati orari che ha portato a ottimi risultati nella minimizzazione della funzione obiettivo. Con il set di parametri stimati si è quindi generata (con l'ausilio del software RainSim V.3) una serie sintetica di dati di pioggia a scansione oraria, che è stata poi validata con successo.

Lo studio delle vasche necessita di dati con risoluzione maggiore, e per questo si è utilizzata la serie temporale registrata a 5 minuti per calibrare un disaggregatore di dati di pioggia. Il modello implementato è un cRMC (canonical Random Multiplicative Cascade), la validazione è stata eseguita utilizzando la serie registrata. Il modello è stato poi applicato alla serie sintetica generata, ottenendo così una serie di dati lunga cento anni a scansione di 15 minuti, che è stata poi utilizzata in input per le analisi sul funzionamento delle vasche.

Il primo passo nell'analisi delle vasche è stato verificare la capacità della serie sintetica a riprodurre il comportamento reale del processo di dilavamento di materiale inquinante, nel bacino in esame, e del conseguente funzionamento delle vasche di prima pioggia. A questo scopo si sono estratti dalla serie tre anni (massimo, medio e minimo), dai quali si sono ricavati gli eventi di pioggia, applicando le regole prescritte dalla Regione Lombardia. Utilizzando i dati degli eventi estratti si sono eseguite simulazioni e dal confronto con le analoghe effettuate con dati reali di pioggia si è verificata l'effettiva compatibilità dei due input di precipitazione. Si è quindi in possesso di un metodo per la generazione di serie sintetiche di pioggia da utilizzare nell'analisi del funzionamento di vasche di prima pioggia.

La seconda parte del lavoro è basata appunto sull'analisi del funzionamento di vasche di prima pioggia. Sono necessari tre modelli: il primo di tipo idrologico, per trasformare gli afflussi meteorici in deflussi di piena, il secondo che simula il processo di accumulo di materiale inquinante sul bacino, e l'ultimo che ne descrive invece il dilavamento.

La prima parte delle valutazioni è basata su analisi a evento, nelle quali si ipotizza il valore dell'accumulo pari a quello asintotico ottenibile dal modello, e un accumulo nullo durante gli eventi. Dall'analisi sono emersi due aspetti: in primo luogo il fenomeno del first flush, alla base della prescrizione normativa sul dimensionamento delle vasche, non è sempre verificata, risulta anzi essere limitata a una minima parte degli eventi analizzati. In secondo luogo le varie combinazioni di parametri adottati (tempo di corrivazione di 15 o 60 minuti, e vasche dimensionate per intercettare 2,5 e 5 mm di pioggia), non danno in nessun caso risultati significativi in termini di rimozione

della massa scaricata o riduzione del picco di concentrazione di inquinante in uscita dalle vasche.

L'estrazione di eventi dalla serie storica ha messo in evidenza un altro aspetto: la normativa prescrive di considerare come distinti due eventi separati da almeno quattro giorni di periodo secco. Seguendo questo criterio sono stati identificati eventi molto lunghi, in alcuni casi di durata superiore al mese. In queste occasioni l'ipotesi fatta sul processo di accumulo è risultata troppo stringente: non è realistico pensare che all'occorrenza di eventi di tale durata, caratterizzati da tempi secchi interni di alcuni giorni, non si abbia nessun accumulo di materiale sul bacino. Oltre a questo non è corretto ipotizzare che, se due eventi sono separati da più di quattro giorni, si raggiunga il valore asintotico della massa accumulabile.

Sulla base di queste considerazioni è stato quindi proposto un approccio continuo nella simulazione delle vasche, modificando il modello di accumulo. Questo modello ha portato a significativo peggioramento nei risultati soprattutto in termini di massa totale scaricata, ma ha anche dimostrato come il fenomeno di deposizione di materiale inquinante debba essere simulato in modo meno approssimato.

### **8.3 Sviluppi futuri**

In conclusione si può affermare che l'input di precipitazione utilizzato è adeguato allo studio delle vasche di prima pioggia. Come ulteriore sviluppo si potrebbe pensare di includere nella calibrazione dei parametri i momenti del terzo ordine, per un cogliere oltre al comportamento medio del campo di pioggia anche i valori massimi e valutare come questo incida sull'analisi delle vasche. Rimane importante sottolineare come il comportamento medio, vero obiettivo per questo tipo di analisi, sia già adeguatamente riprodotto. Uno sviluppo significativo sarebbe anche una regionalizzazione del metodo: il caso analizzato tratta di un sito specifico dotato di una stazione di misura, che non sempre si verifica nelle applicazioni pratiche. Esiste una versione del modello utilizzato spazialmente distribuita, che sfrutta i dati di pioggia delle stazioni presenti in una certa regione per la generazione di serie sintetiche. In questo modo si avrebbero dati di pioggia distribuiti in tutto il territorio, anche in quelle aree che, pur essendo urbanizzate, non hanno stazioni di misura locali. Per raggiungere la scansione temporale desiderata si può poi applicare il modello di disaggregazione proposto che, nella sua definizione, è costante per regioni climaticamente omogenee.

Per la parte riguardante l'analisi del funzionamento delle vasche i modelli utilizzati non tengono conto di diversi aspetti. In primo luogo non vengono considerate azioni come il lavaggio periodico delle superfici stradali, o l'effetto di politiche quali il blocco del traffico in aree urbane. In secondo luogo i parametri utilizzati sia nel modello di accumulo che in quello di dilavamento sono i più comuni in letteratura, sarebbe quindi necessaria una caratterizzazione sito-specifica di questi aspetti.

In ogni caso il dimensionamento delle vasche di prima pioggia basato sul principio di allontanare le prime acque meteoriche non sembra adeguato, soprattutto per l'infodatezza dimostrata dell'ipotesi di first flush. Potrebbe rivelarsi vantaggioso superare questo tipo di dimensionamento, in favore di metodi che prendano in considerazione i processi che guidano questo tipo di aspetti.

## Appendice A

### Routine di calcolo del software RainSim V3.1.1

Questa appendice ha lo scopo di mostrare le procedure ed i comandi utilizzati in questo studio tramite software RainSim V3.1.1 (Burton et al.,2008). Come anticipato nel Capitolo 3 questo software opera in tre diverse fasi: la prima di analisi della serie di dati con cui calibrare il modello, la seconda in cui si compie il fitting sulle statistiche calcolate al passo precedente e la terza in cui si genera una serie sintetica di determinata lunghezza e risoluzione temporale. Nei paragrafi seguenti verranno esposti i comandi e i file richiesti dal software utilizzati in questo studio.

#### A.1 Analisi della serie di dati

La prima fase per l'implementazione del software è una base di dati con le quali operare la stima. I file richiesti in input per questa sezione sono di tre tipi.

- Un file che definisce il bacino in esame, in realtà per l'applicazione single-site non ricopre un ruolo fondamentale, serve comunque per il software a identificare un dominio di competenza. Nel nostro caso si è utilizzato il file inserito nella demo del programma, senza modifiche, come indicato nel manuale di utilizzo (Burton, 2008). Questo file sarà necessario per tutte le componenti implementate.

Nome file: rainsim.defcat

```
Catchment simple
Comment Required for single site applications of RainSim. DO NOT
EDIT
NObs 1 NVir 0
OSite obs1 A single observed site
0.0 0.0 0.0 1.0
1 1985 1 1 0 1 filename f 0 1
```

- Un file contenente la serie di dati disponibile, senza intestazioni né altre informazioni, ma solo una colonna contenente i valori misurati. Le informazioni a corredo della serie verranno fornite nel comando per eseguire l'analisi.

Nome file: serie21anni60min.ts

- Infine un file contenente le statistiche che si vogliono calcolare, identificate tramite degli acronimi. Tutte le statistiche devono essere riferite a un sito, nel nostro caso sempre lo stesso, ad ognuna deve essere inoltre specificato il peso e l'aggregazione temporale per la quale si desidera operare il calcolo. Gli asterischi stanno ad indicare i valori non noti delle statistiche lungo i mesi dell'anno (la prima corrisponde a gennaio e l'ultima a dicembre).

Nome file: stats.template

Statistics

Comment	Example	template	stats
NStats	5		
Month	-1		
mean	obs1 1	1	#####
var	obs1 1	1	#####
covar	obs1 1	1	1 obs1 #####
corr	obs1 1	1	1 obs1 #####
pdry0.0	obs1 1	1	#####

Con questi file è possibile operare l'analisi della serie di dati, tramite la seguente stringa di comando dal Prompt dei comandi, una volta entrati nella directory di lavoro.

```
RainSim -a serie21anni60min.ts 1971 1 21 0 1
stats.template statistiche.campionarie.sta
```

Dove il primo termine è il comando che identifica l'analisi di una serie di dati, i due termini dopo il nome del file contenente i dati indicano anno e mese di inizio serie, durata (anni e mesi) e risoluzione dei dati espressa in ore. Quest'ultimo valore può assumere solo valori interi, ed è per questo che non si può utilizzare il software con dati a risoluzione inferiore all'ora. Il file `statistiche.campionarie.sta` è l'output dell'analisi e verrà utilizzato come input nella successiva sezione di calibrazione.



## A.2 Fitting delle statistiche campionarie

La seconda fase è quella relativa alla calibrazione dei parametri del modello. Il software implementa in questa sezione un algoritmo di ottimizzazione, con funzione obiettivo corrispondente alla 4.1. I file necessari per questa operazione sono, oltre al file .defcat, i seguenti.

- Il file di output della sezione precedente contenente le statistiche calcolate sulla base di dati.

Nome file: statistiche.campionarie.sta

```

Statistics
Comment Example      template  stats

NStats 5
Month -1
mean obs1 1 1.000000 # # 0.106736 0.101091 0.115195 0.136560
                                0.160670 0.095012 0.080978 0.118663
                                0.102812 0.151500 0.102949 0.075051
var obs1 1 1.000000 # # 0.205398 0.188309 0.265693 0.434640
                                0.825859 0.760565 1.014497 1.424057
                                0.800563 0.966427 0.248941 0.151862
covar obs1 1 1.00 1 obs1 0.175761 0.153259 0.207143 0.249081
                                0.454476 0.232349 0.223271 0.656237
                                0.422120 0.586450 0.185765 0.125674
corr obs1 1 1.00 1 obs1 0.856435 0.813925 0.778740 0.573271
                                0.549968 0.305077 0.219786 0.460209
                                0.526575 0.606045 0.745496 0.827208
pdry0.0 obs1 1 1.00 # # 0.891449 0.903316 0.908602 0.900926
                                0.903866 0.950000 0.972734 0.960509
                                0.956217 0.915131 0.908069 0.925435
    
```

- Un file contenente dei valori di primo tentativo dei parametri, che verranno utilizzati nel primo step di ottimizzazione. Per questo studio è stato ripreso il file contenuto nella demo del programma. Per motivi di spazio il file è riportato in righe invece che anche se nella versione originale risulta incolonnato.

Nome file: 1D.init.param.par

```

Parameters starting
Sensible initial values for a basic parameter fit
NCT 1
Lambda Beta NCellsDist P IntensityDist E Nu Eta Xi
0.01 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 5 2.0 1.0
0.01 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 5 2.0 1.0
0.01 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 5 2.0 1.0
0.01 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 5 2.0 1.0
0.01 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 5 2.0 1.0
0.01 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 5 2.0 1.0
    
```

0.01	0.1		5	2.0	1.0
0.01	0.1		5	2.0	1.0
0.01	0.1		5	2.0	1.0
0.01	0.1		5	2.0	1.0
0.01	0.1		5	2.0	1.0
0.01	0.1		5	2.0	1.0

A questo punto è possibile anche operare la procedura di fitting. La stringa di comando utilizzata è la seguente.

```
RainSim      -f  statistiche.campionarie.sta 1D.init.param.par
              parametri.par -fs statistiche.stimate.sta
```

In output a questa fase vi è il file contenente i parametri stimati `parametri.par` mentre inserendo anche il comando `-fs` è possibile ottenere anche le statistiche stimate.

Nome file: `statistiche.stimate.sta`

```
Statistics
Comment Statistics derived from: Fitted to statistics:
NStats 5
Month -1
mean obs1 1 1.000000 # # 0.106418 0.101000 0.115117 0.136560
                        0.160784 0.095115 0.081010 0.118721
                        0.102861 0.151715 0.102949 0.075051
var obs1 1 1.000000 # # 0.206382 0.188511 0.266017 0.434595
                        0.825739 0.760474 1.014450 1.424063
                        0.800632 0.966394 0.249079 0.151905
covar obs1 1 1.00 1 obs1 0.176716 0.153423 0.207192 0.249101
                        0.454374 0.232270 0.223254 0.656196
                        0.422038 0.586318 0.185718 0.125661
corr obs1 1 1.00 1 obs1 0.856256 0.813869 0.778869 0.573179
                        0.550264 0.305429 0.220074 0.460792
                        0.527131 0.606708 0.745620 0.827230
pdry0.0 obs1 1 1.00 # # 0.886019 0.899438 0.904701 0.900926
                        0.912604 0.959764 0.976904 0.969634
                        0.961459 0.935601 0.908069 0.925435
```

### A.3 Simulazione di una serie storica

Una volta stimati i parametri è possibile accedere all'ultima operazione che il programma è in grado di eseguire: la simulazione di una serie storica. Questo passo richiede in ingresso il solo file contenente i parametri, prodotto al punto precedente, e fornisce in output una serie sintetica di durata e risoluzione a piacere. Data la variabilità dei dati in funzione del livello di aggregazione (Calenda e Napolitano, 2009), si è deciso di generare una serie a scansione oraria.

Nome file: parametri.par

```
Parameters starting
Sensible initial values for a basic parameter fit
NCT 1
Lambda   Beta      Nu      Eta      Xi
0.00627  0.093591  8.219475  0.356602  1.358304
0.01099  0.499999  22.266041  0.777563  3.115751
0.01118  0.499999  21.845931  0.955881  2.21924
0.01767  0.491978  9.074598  1.71127  0.686296
0.02342  0.023423  1.995785  0.998911  0.291059
0.03038  0.03042  0.939052  2.201321  0.136249
0.02312  0.16721  0.801883  3.208392  0.071328
0.01446  0.020014  1.22692  1.320826  0.113106
0.02136  0.021384  0.958036  1.064605  0.186872
0.04992  0.157265  0.635368  0.836768  0.24986
0.00932  0.258141  10.539418  0.832417  1.146115
0.00881  0.442246  6.672965  0.482961  1.622785
```

La linea di comando necessaria per la generazione di una serie sintetica è la seguente.

```
RainSim -f parametri.par gen.100anni.1h.ts 1900 100 3600
```

Da questo comando viene generata una serie sintetica di durata 100 anni con scansione temporale 3600 secondi dal nome `gen.100anni.1h.ts`.

Si sono quindi espone tutte le applicazioni del programma RainSim V3 utilizzate per questo lavoro, e i relativi file generati. Per ulteriori approfondimenti si rimanda al manuale di utilizzo della versione free (Burton, 2008).

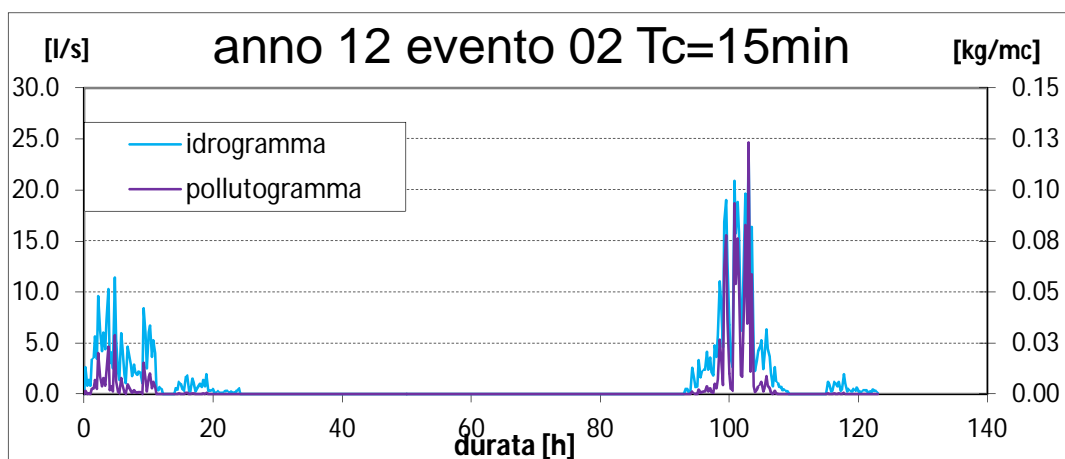
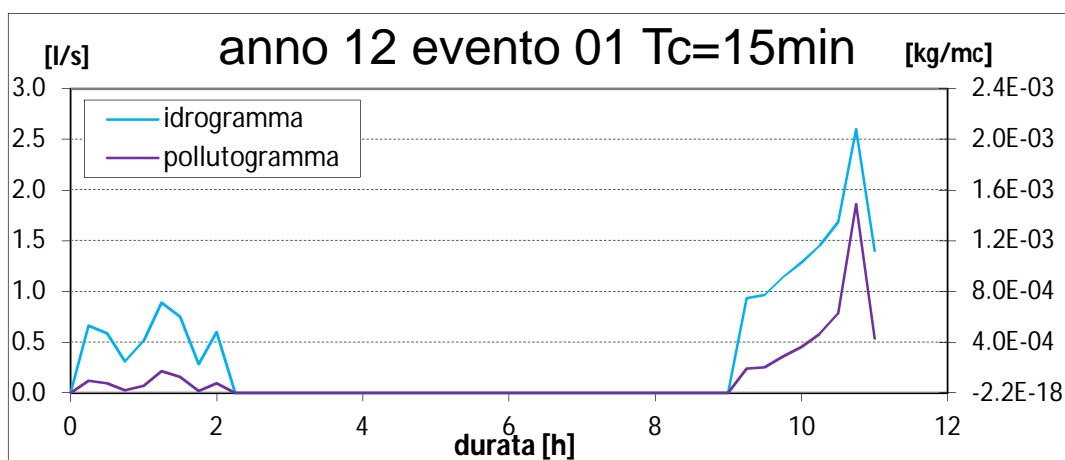
## Appendice B

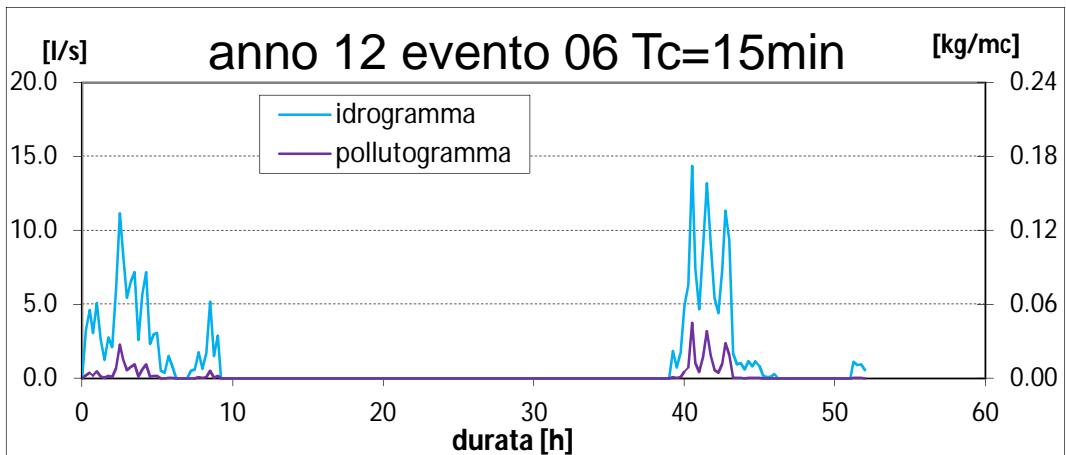
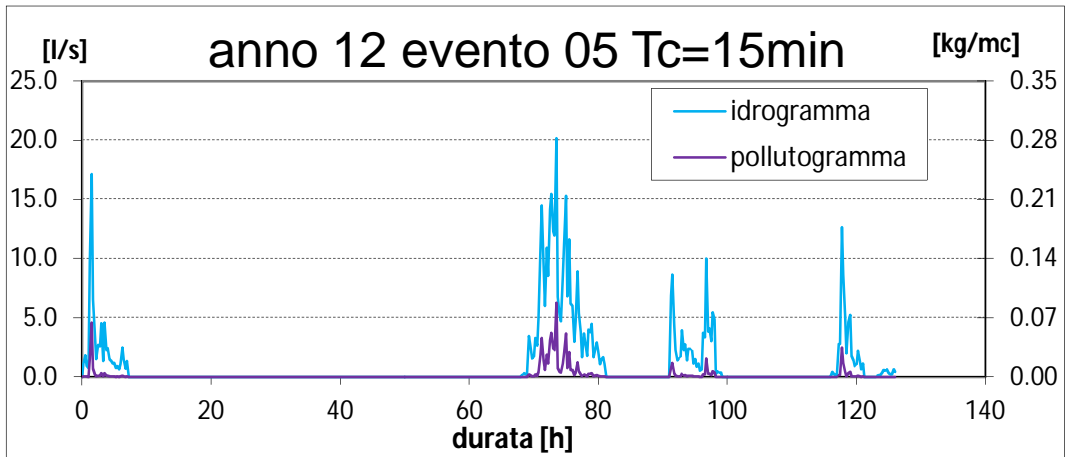
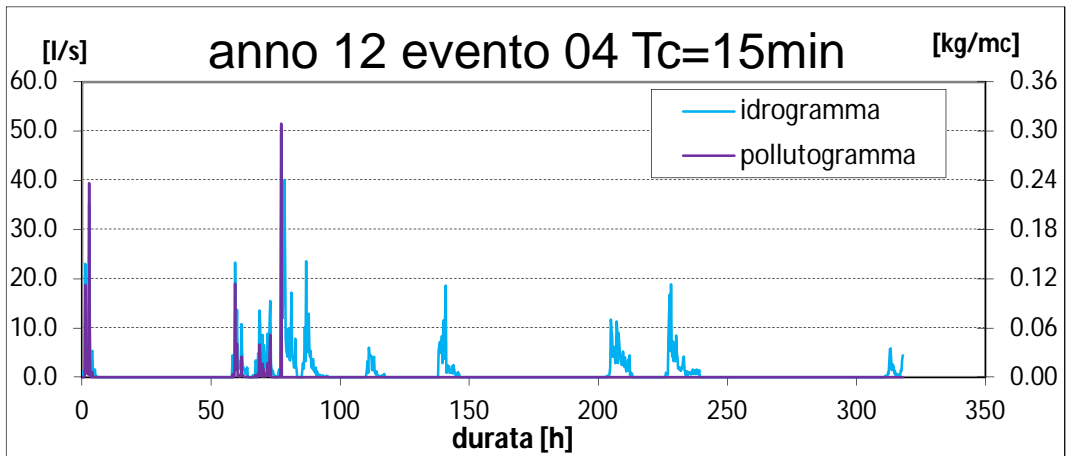
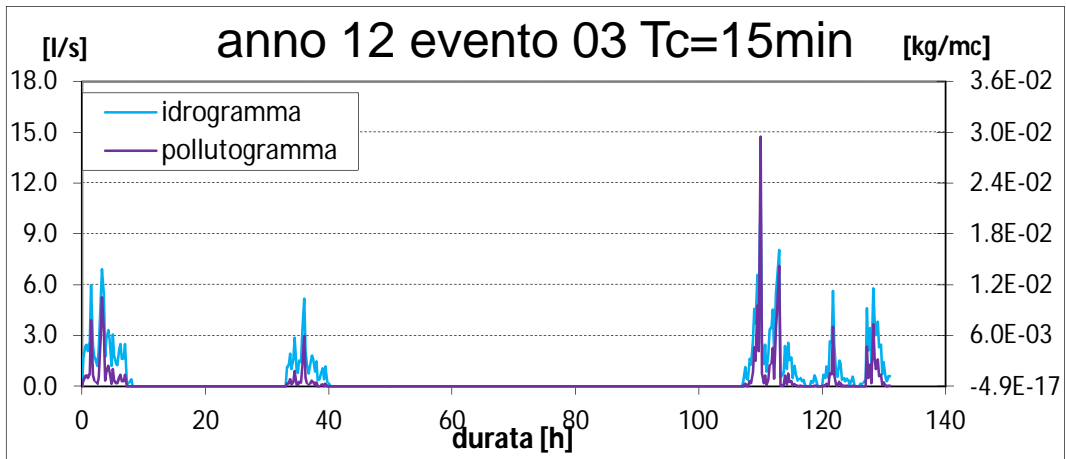
### Idrogrammi e Pollutogrammi degli eventi analizzati

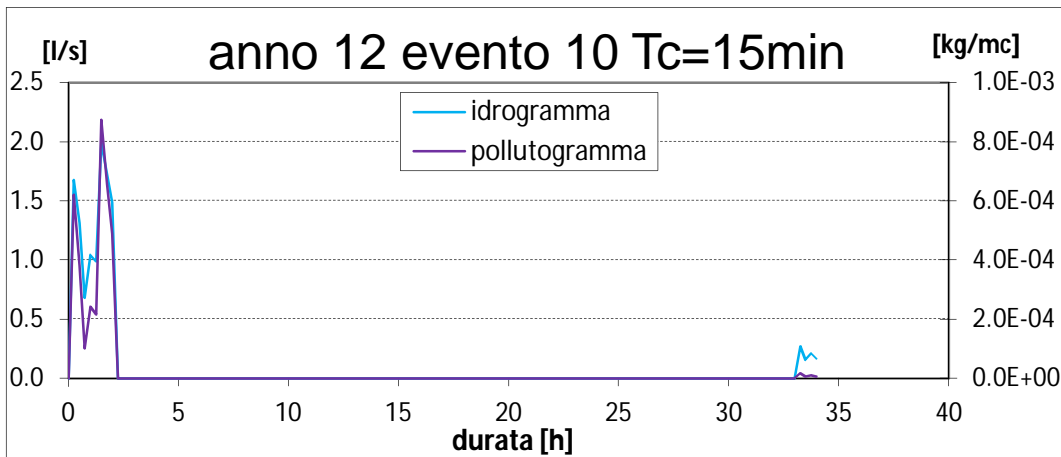
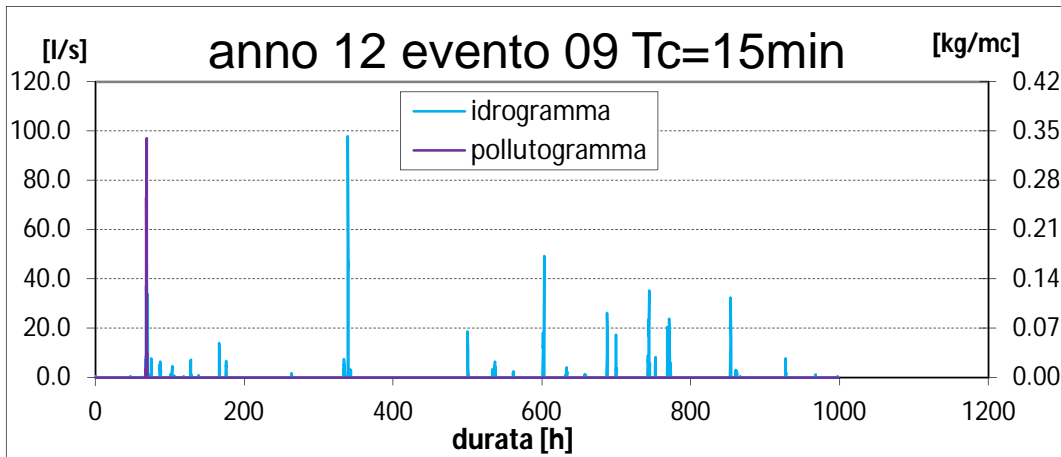
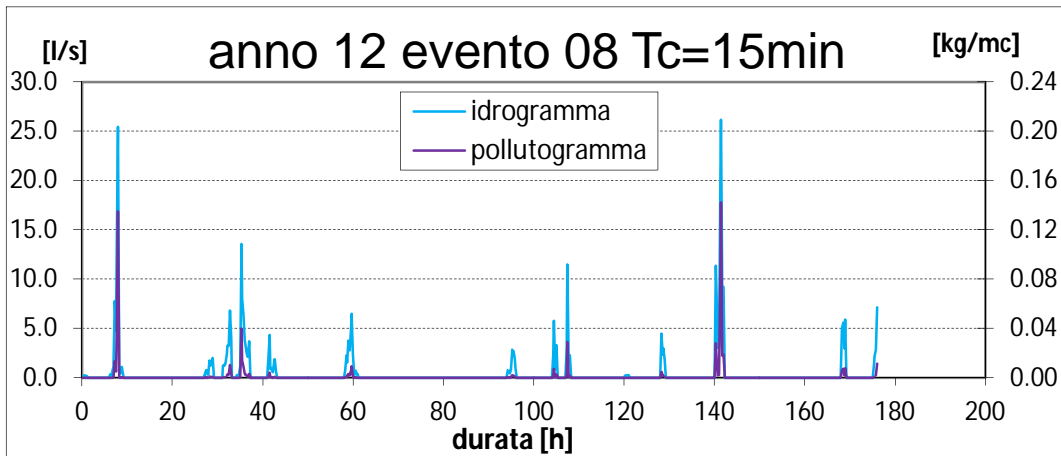
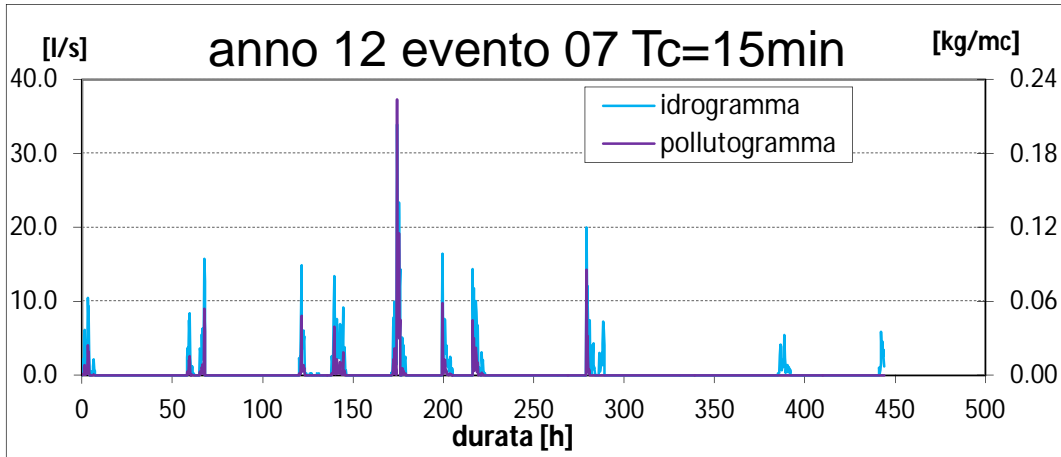
Nell'appendice si riportano tutti i grafici relativi alle simulazioni ad evento, contenenti idrogrammi e pollutogrammi, per tempi di corrivazione di 15 e 60 minuti. i modelli e i parametri utilizzati per il calcolo sono gli stessi esposti nella tesi. L'Appendice è divisa in tre parti, ognuna delle quali riporta i risultati di uno dei tre anni analizzati.

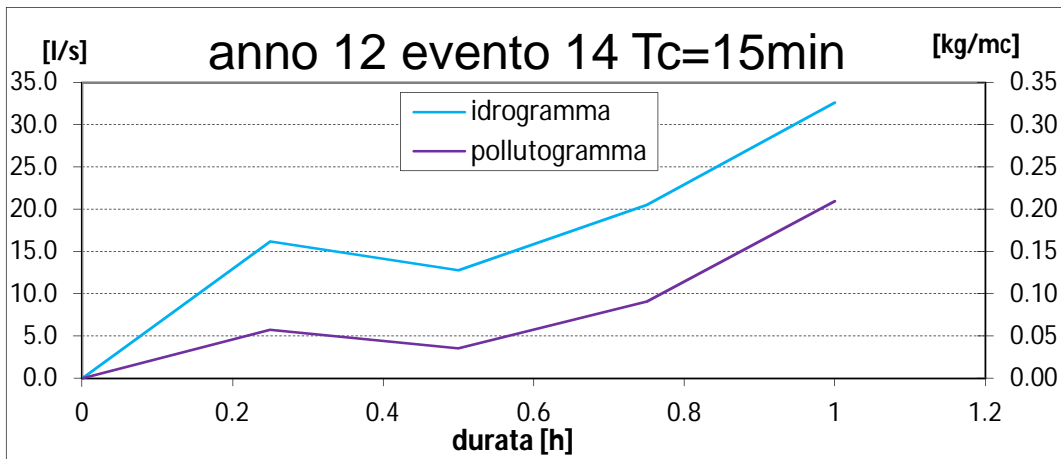
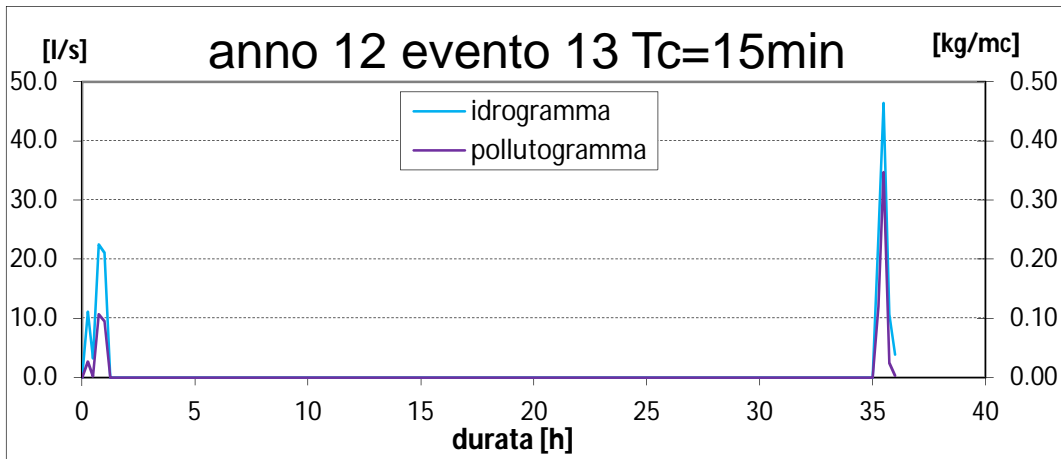
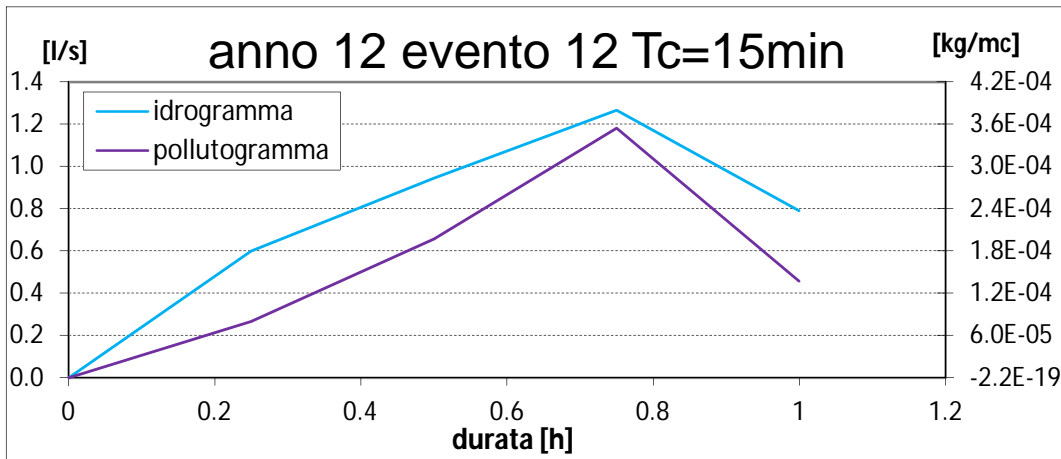
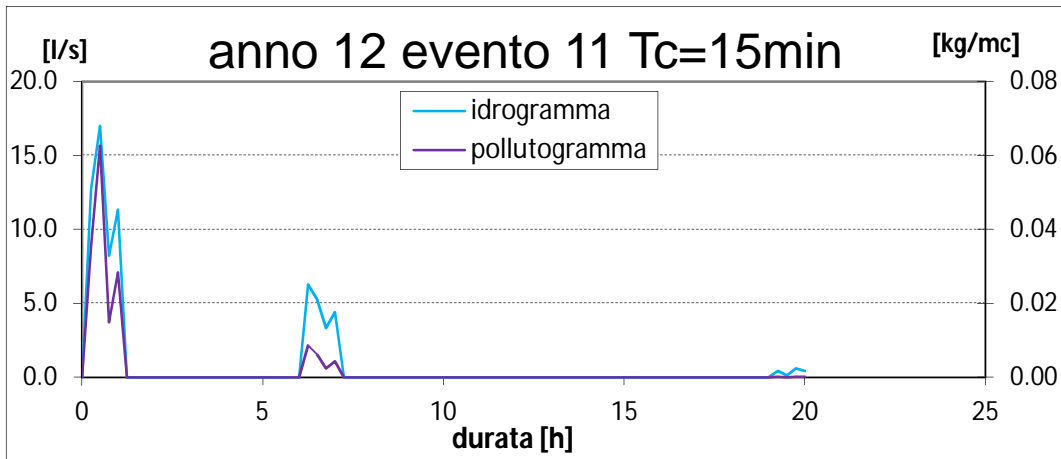
#### B.1 Anno medio: numero 12

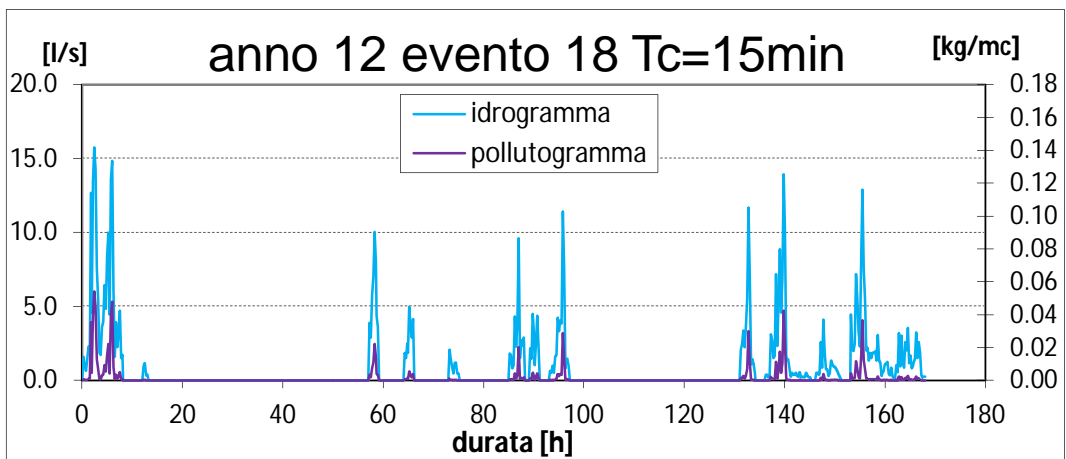
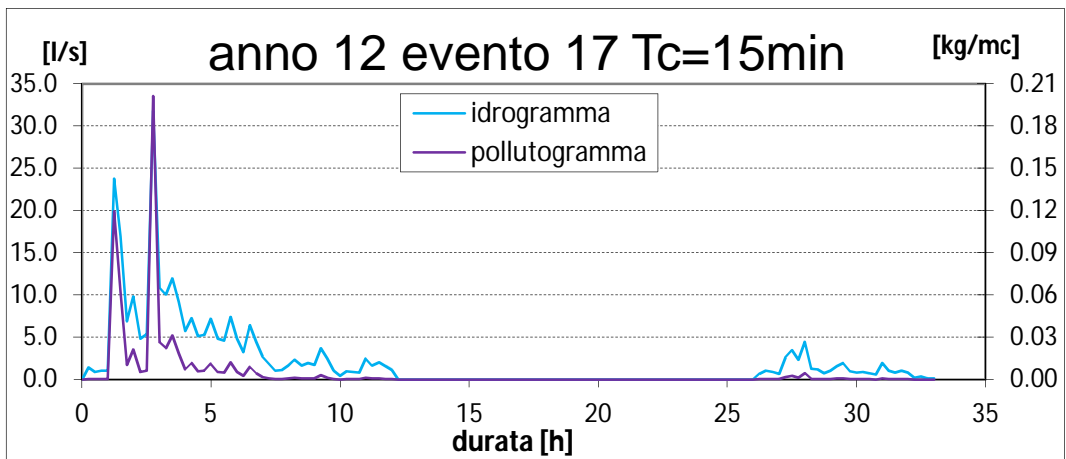
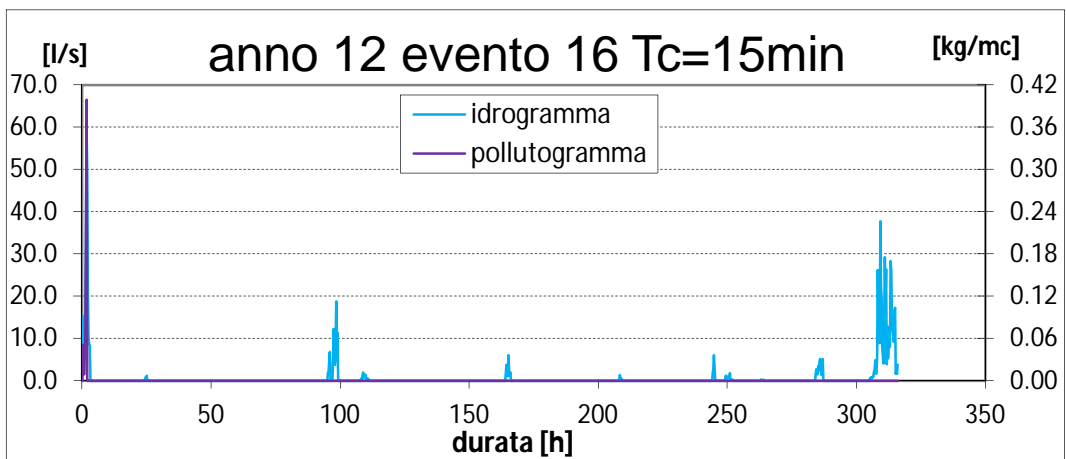
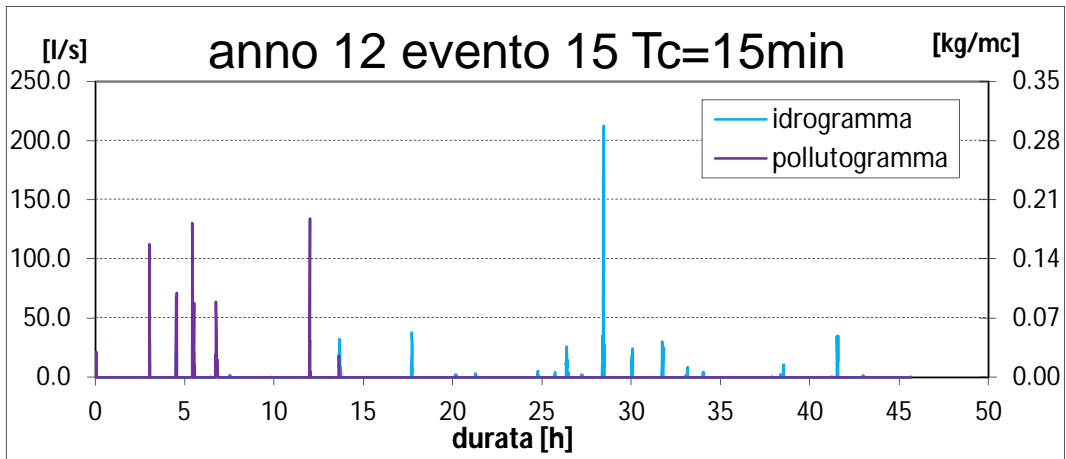
Tempo di corrivazione 15 minuti



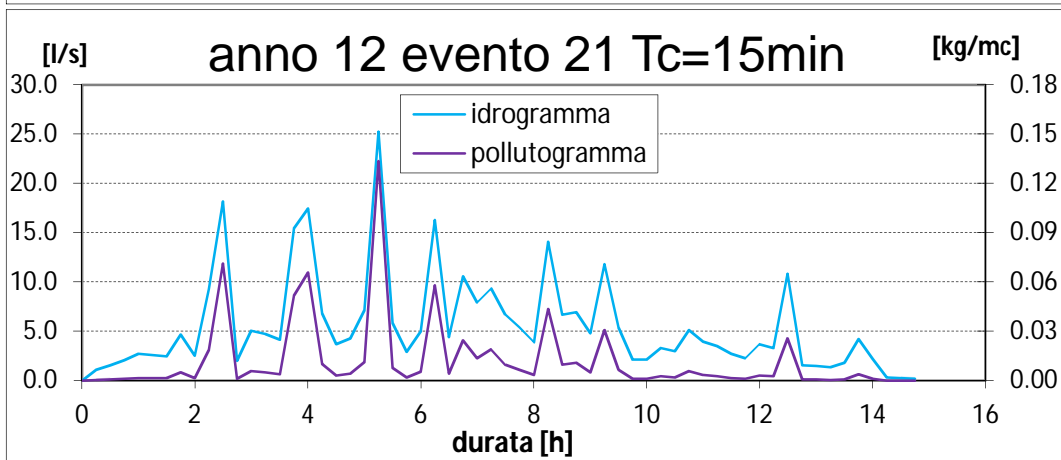
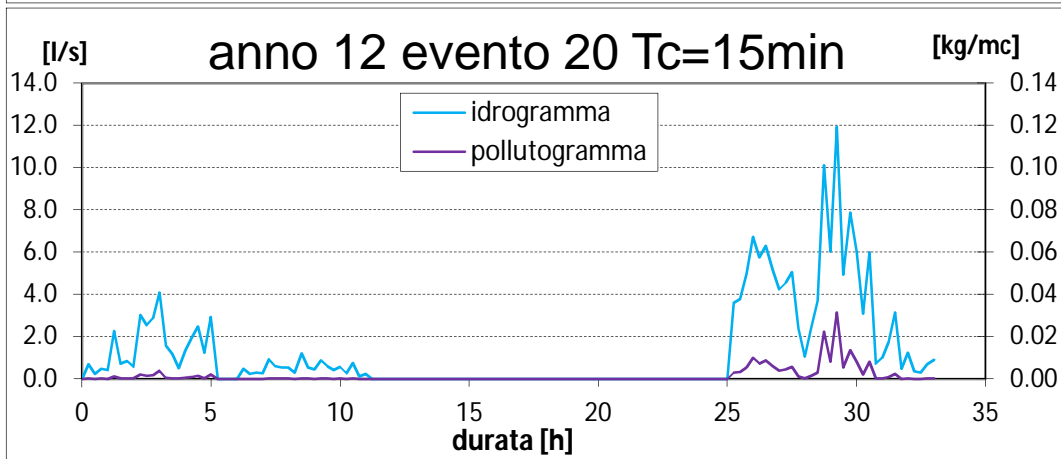
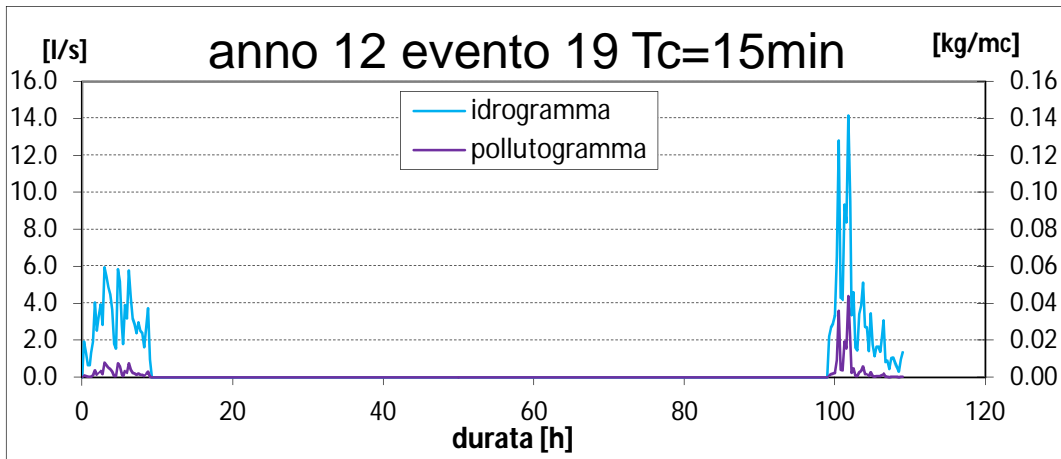




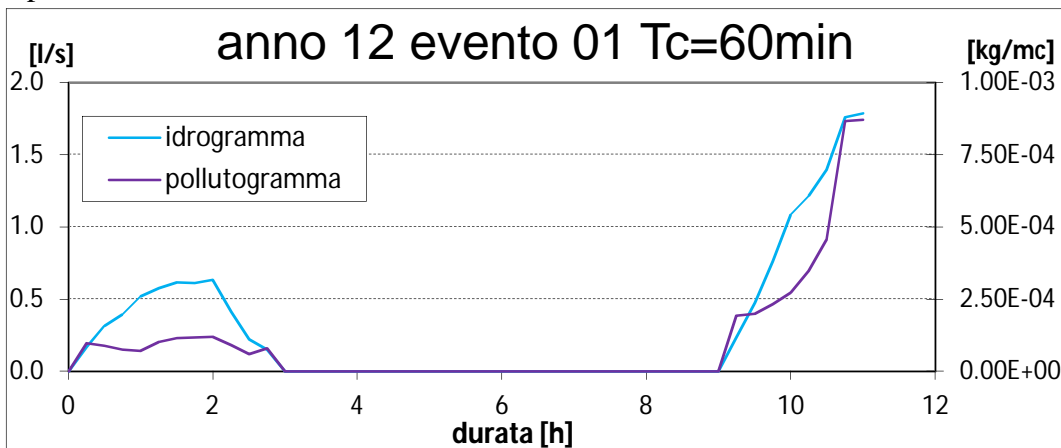


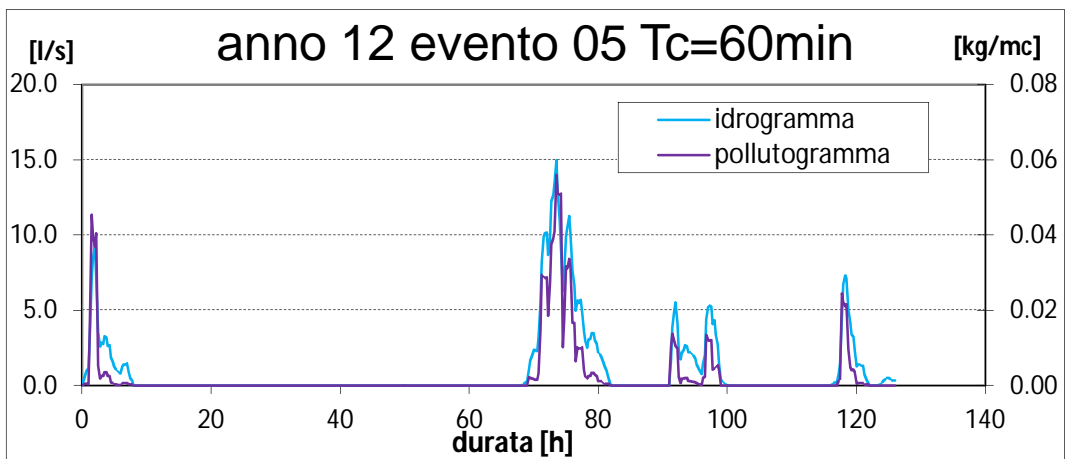
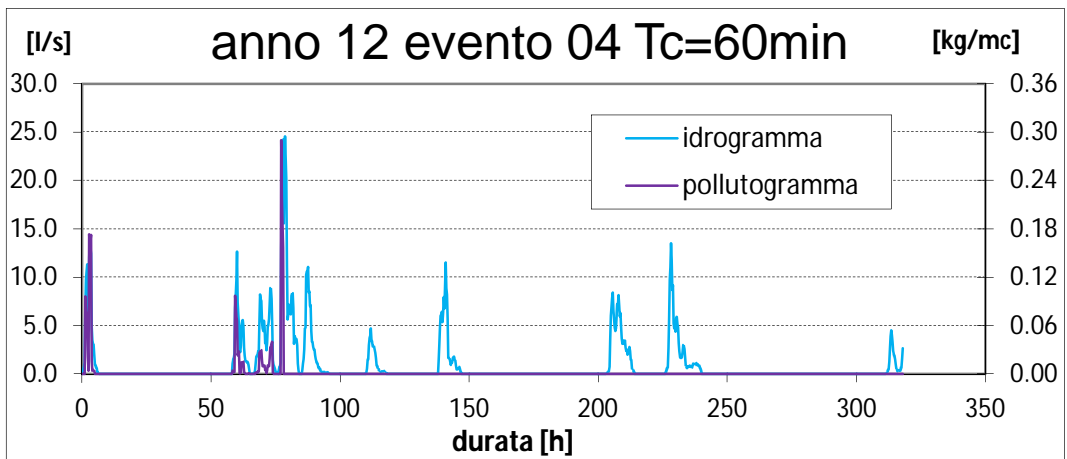
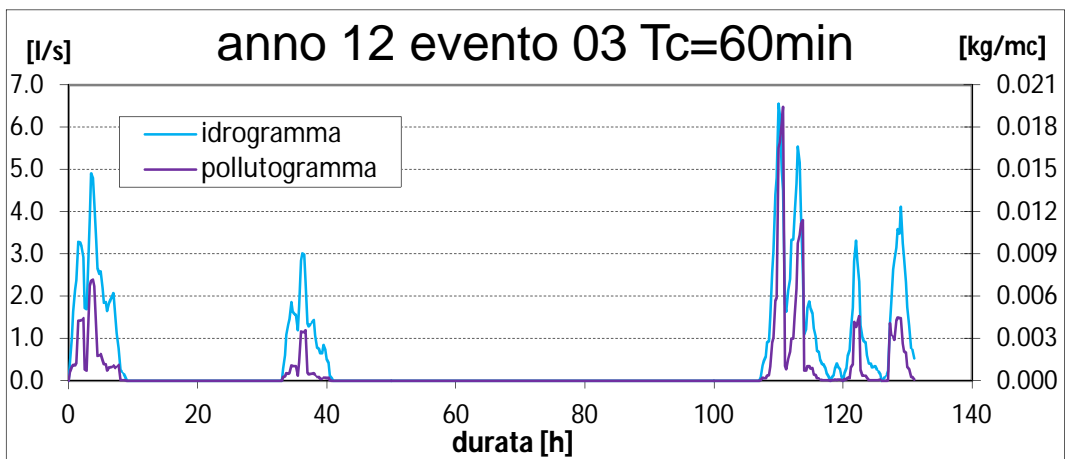
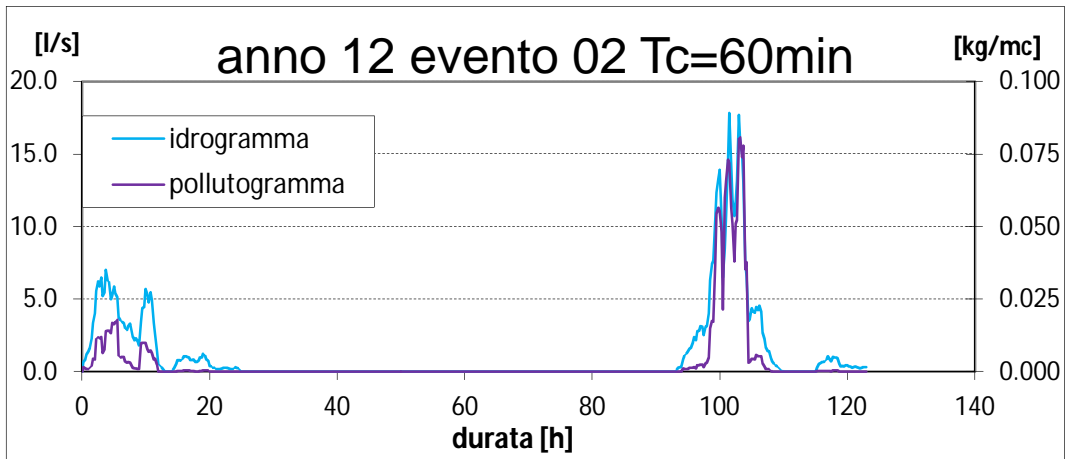


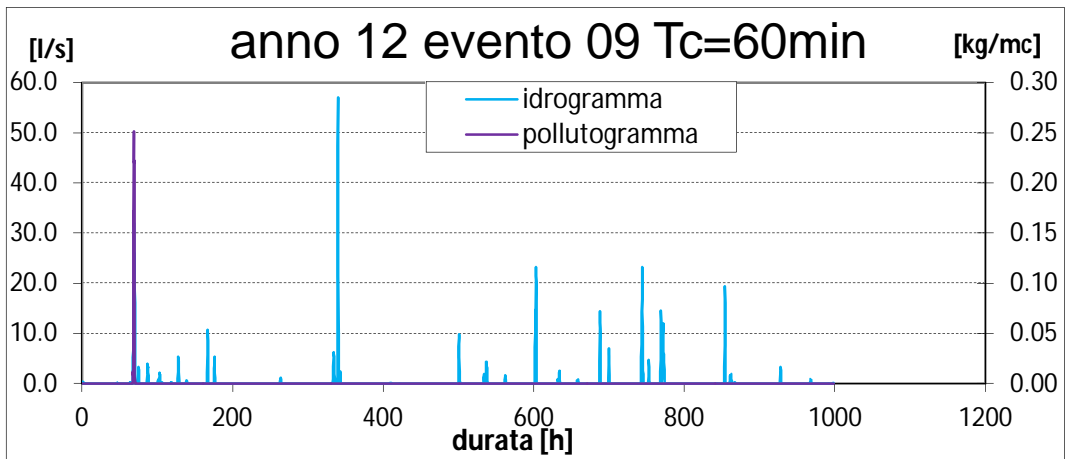
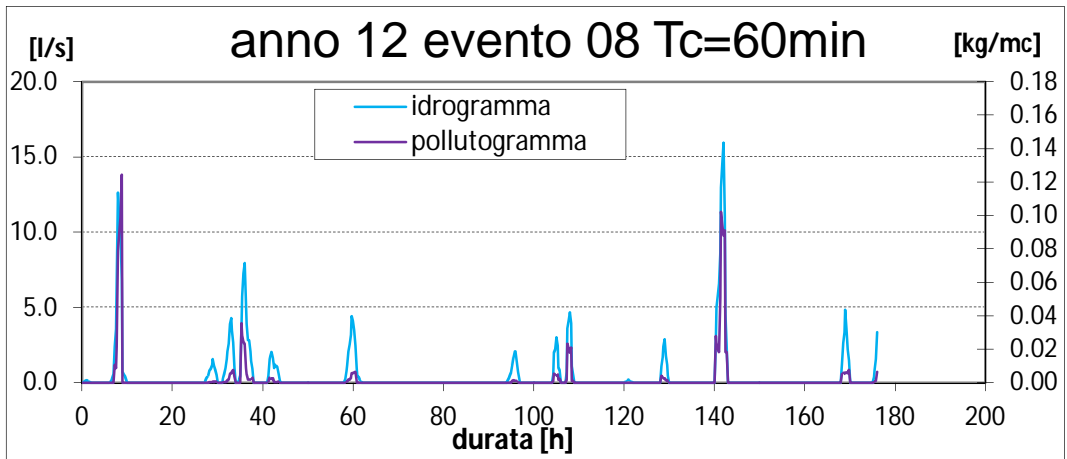
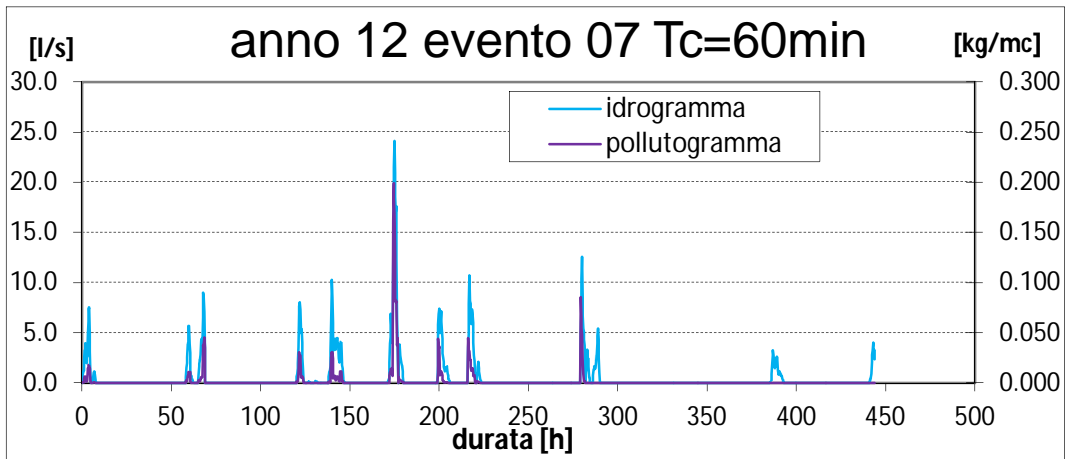
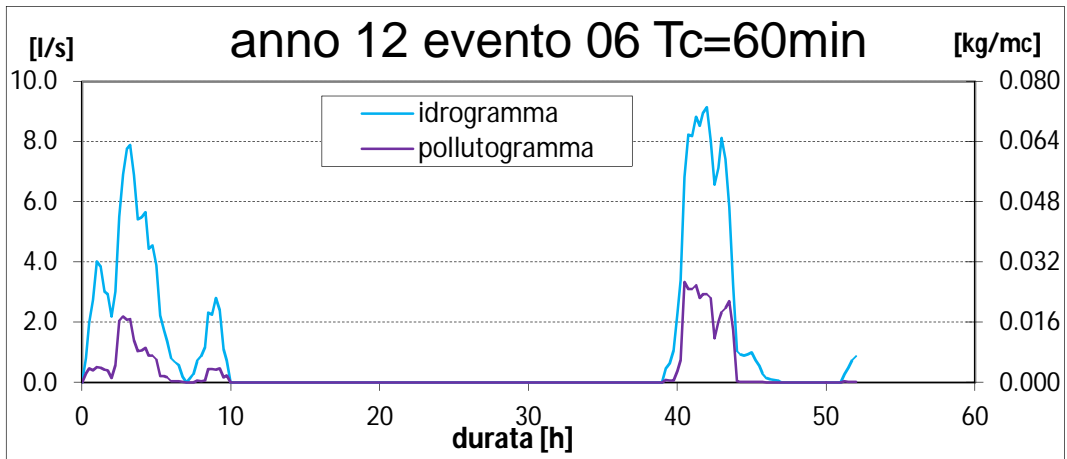


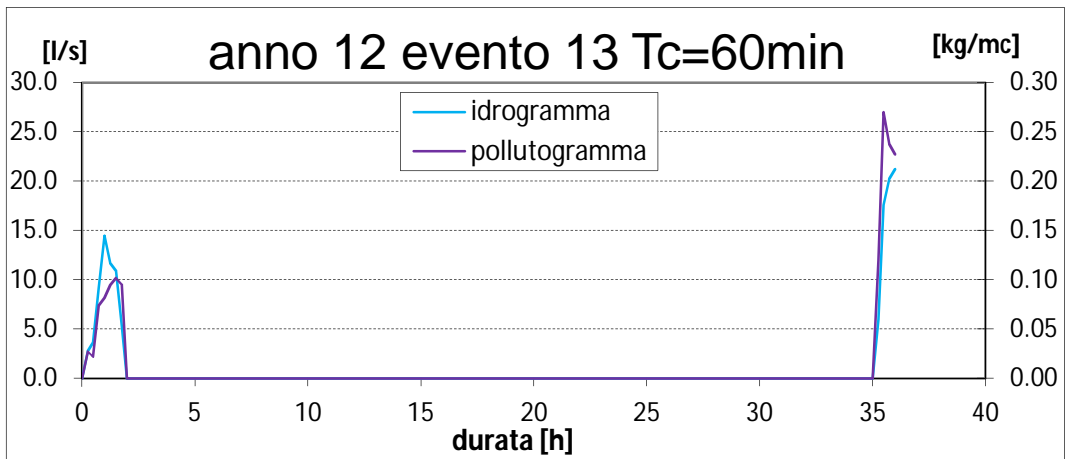
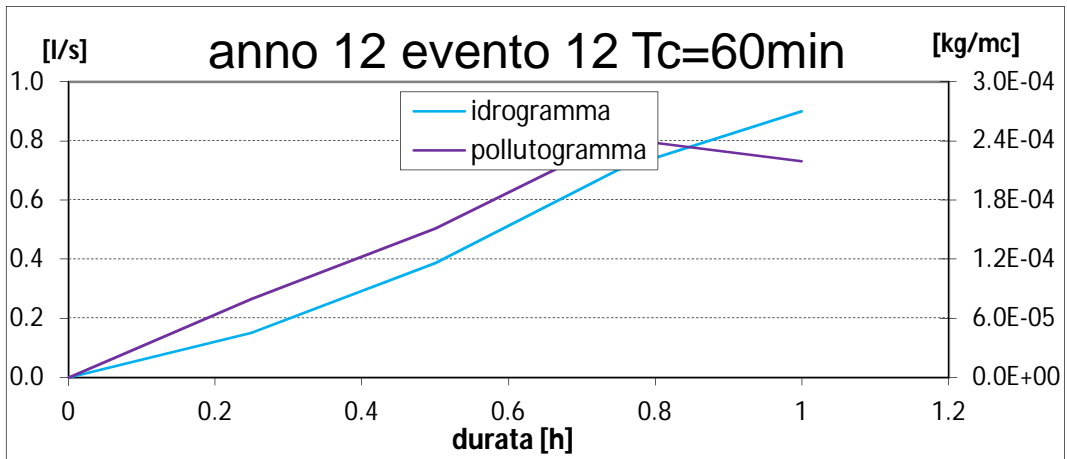
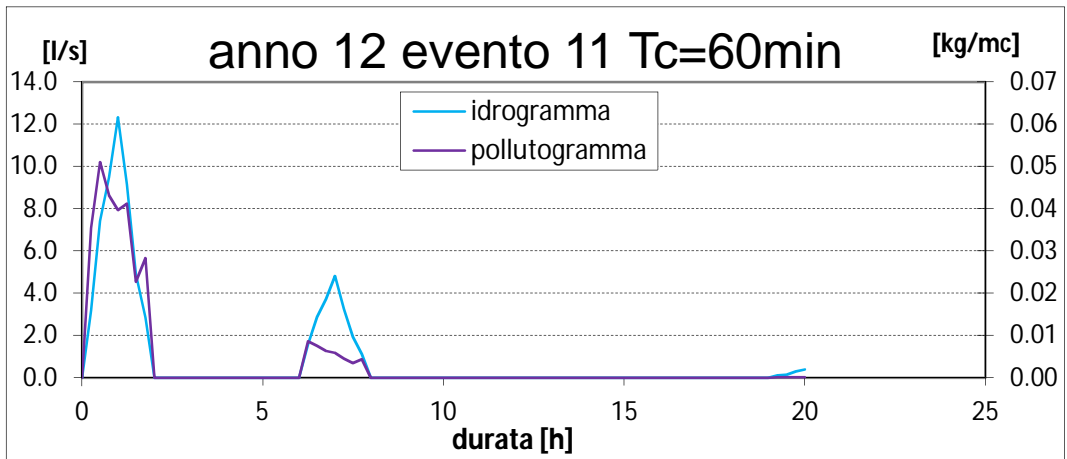
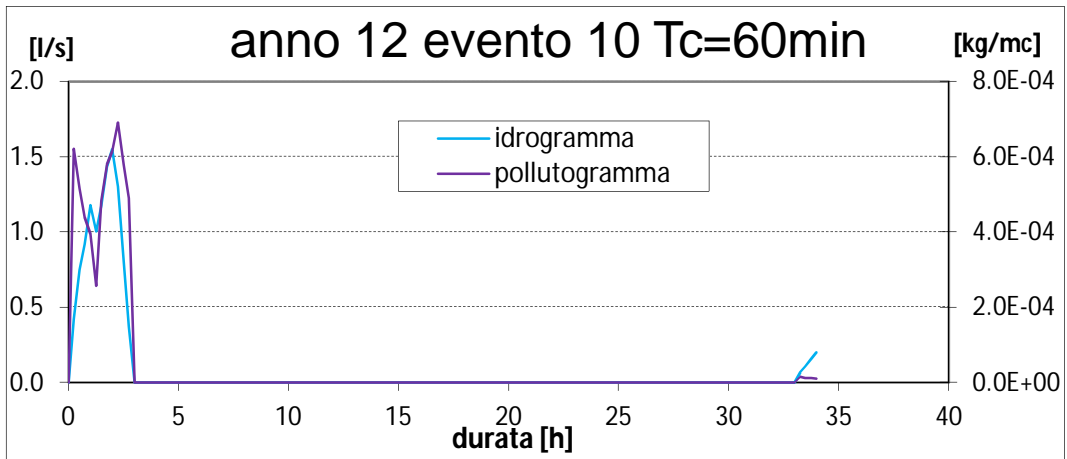


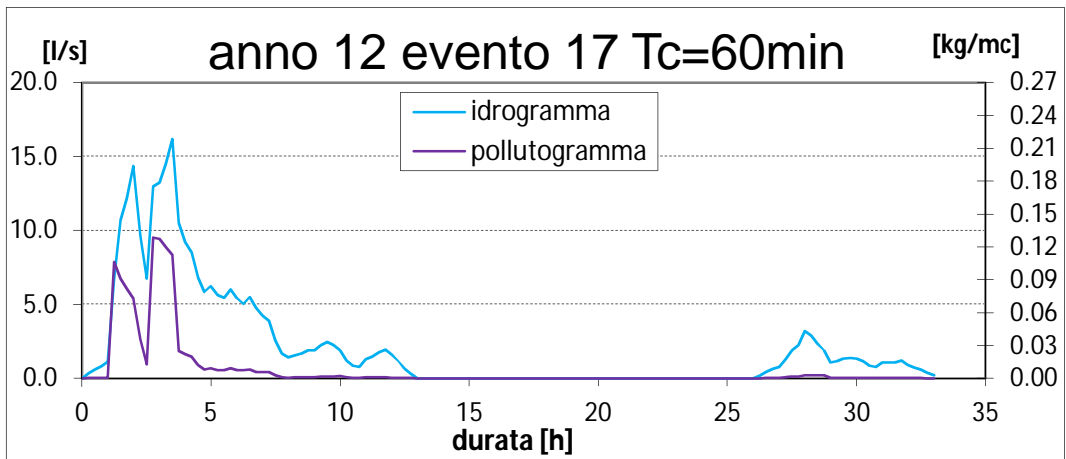
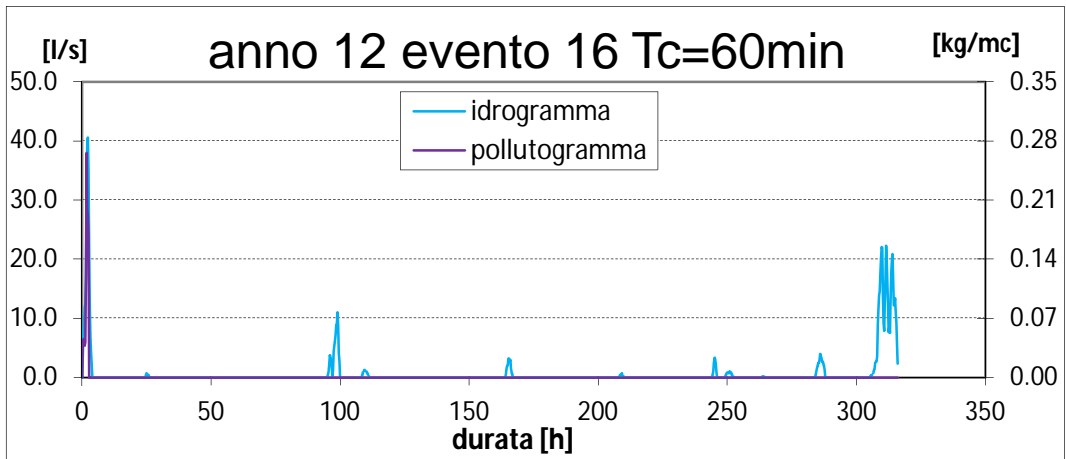
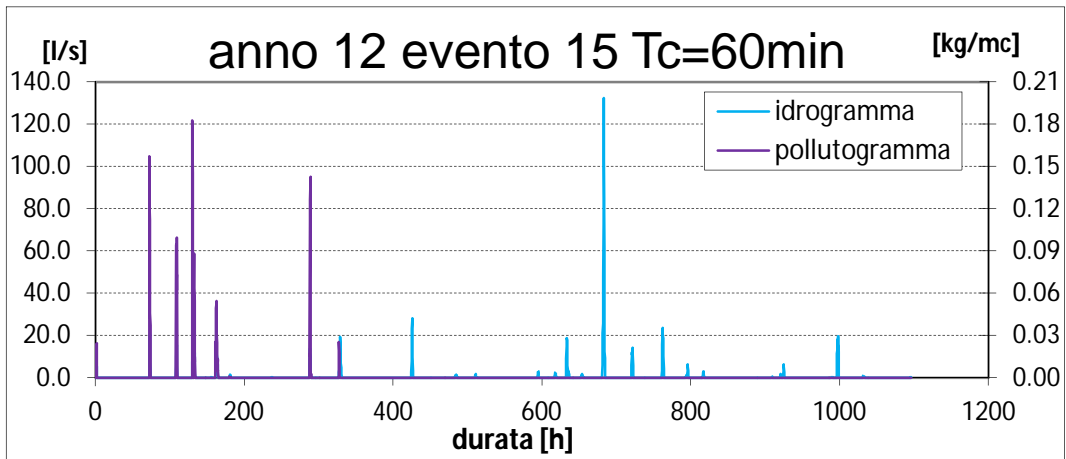
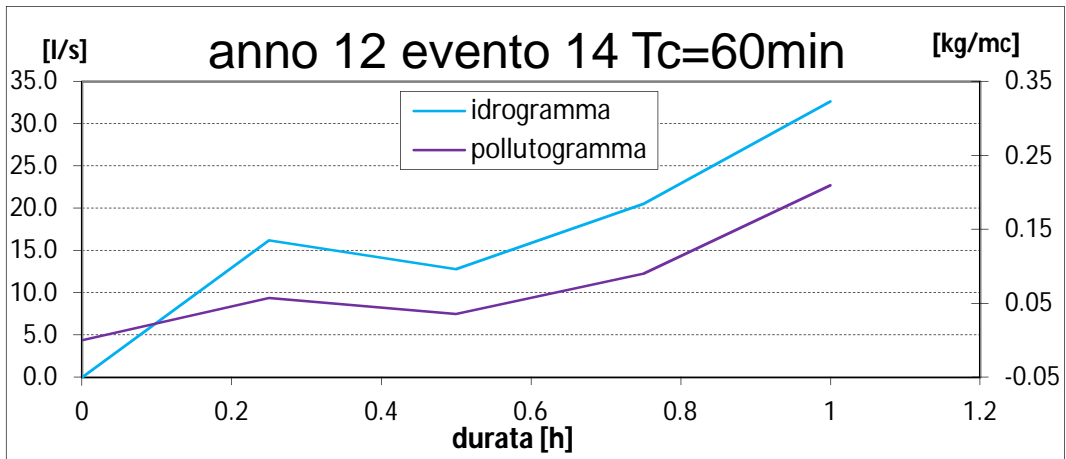
Tempo di corrivazione 60 minuti

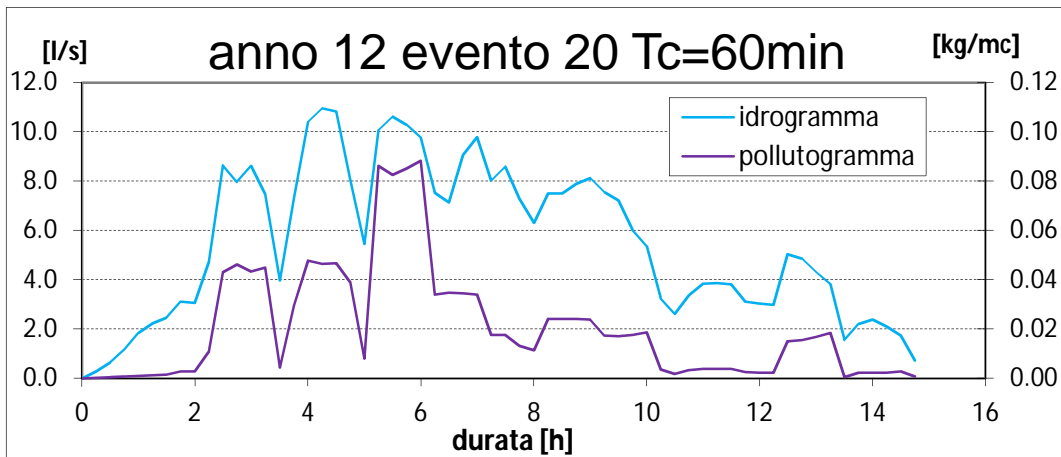
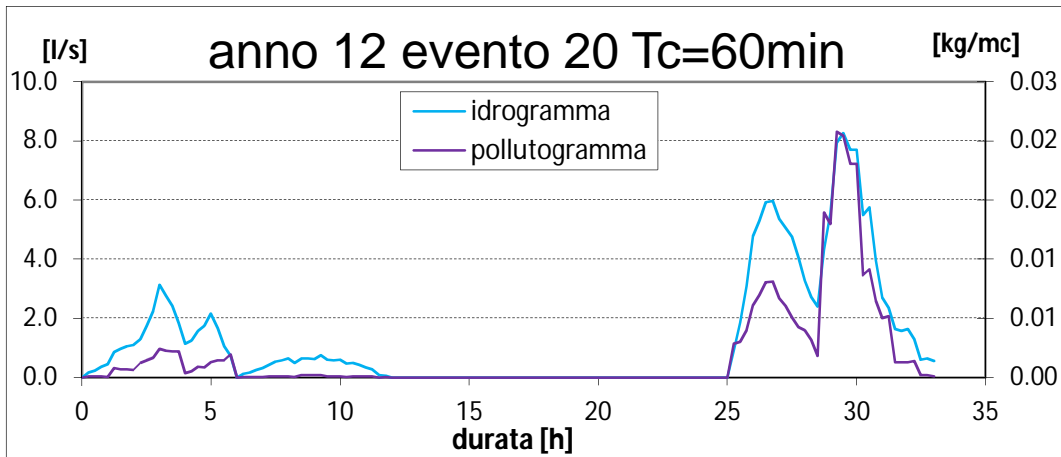
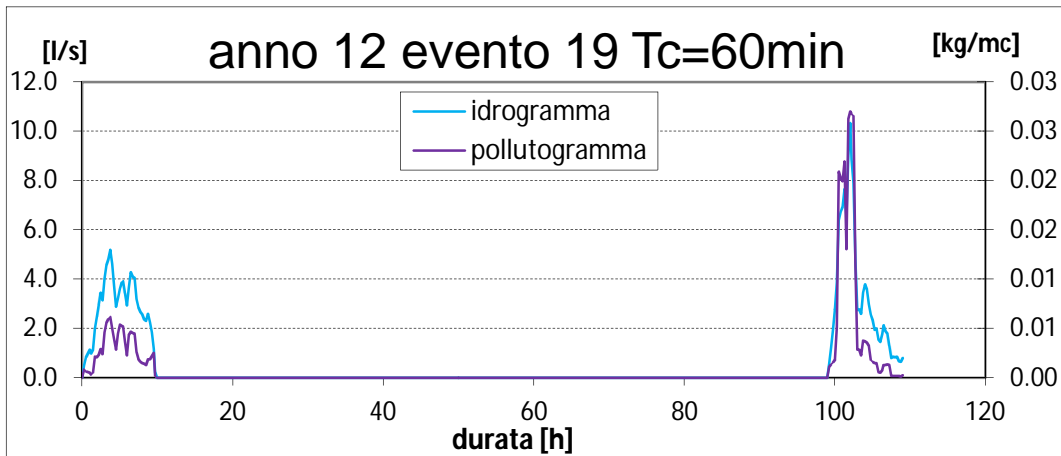
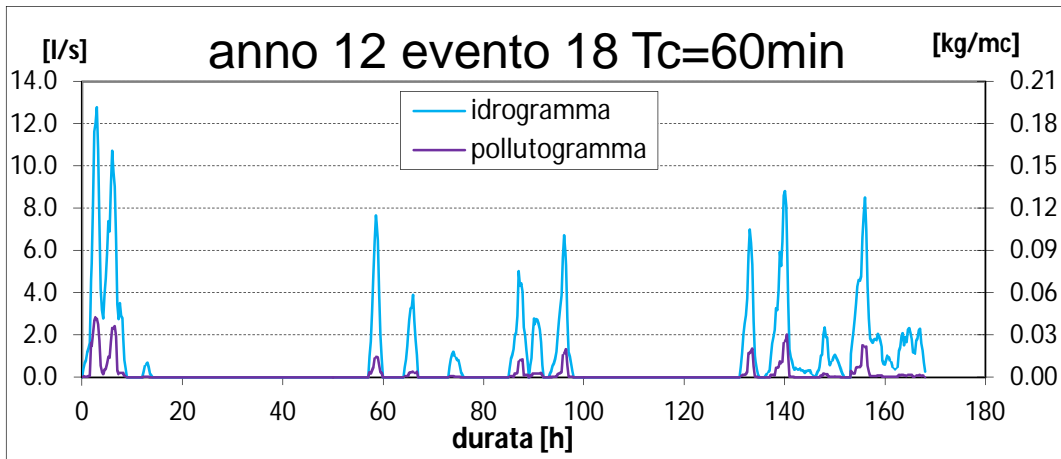






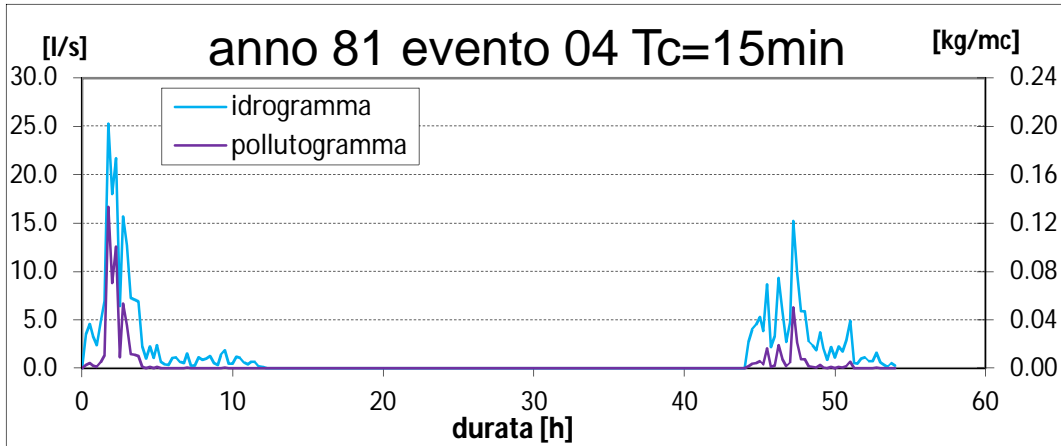
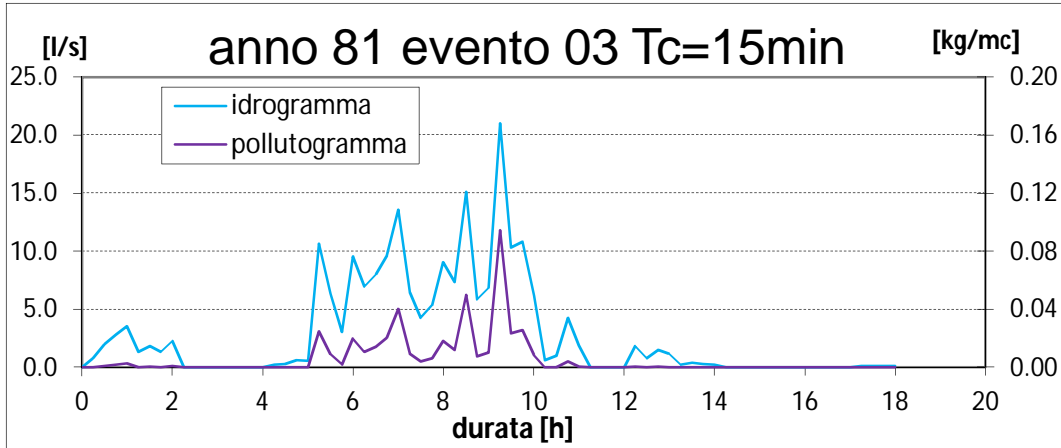
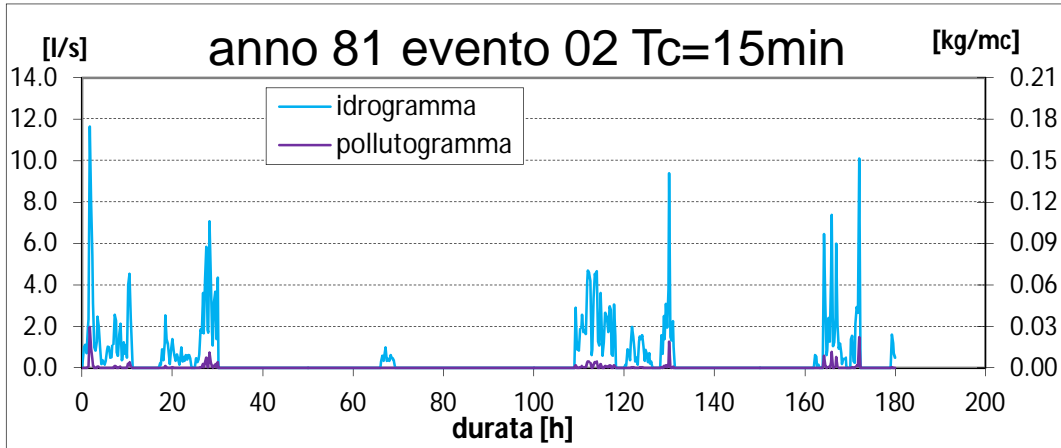
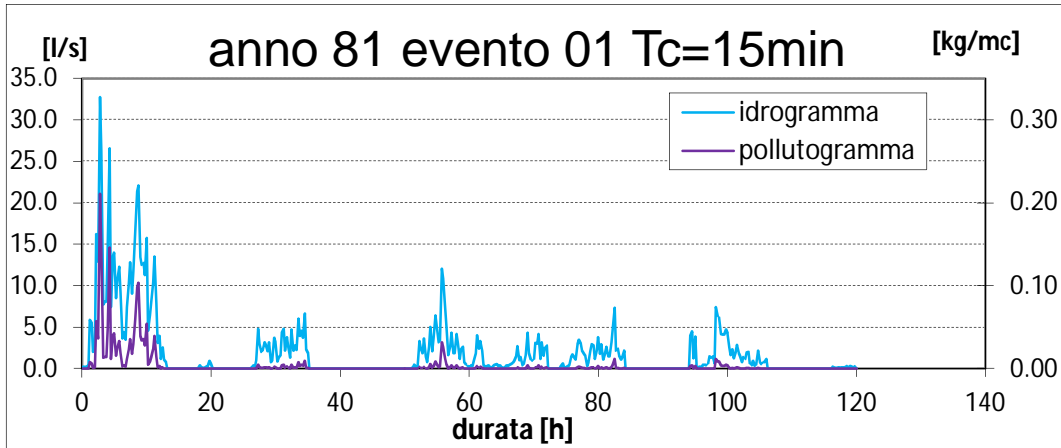


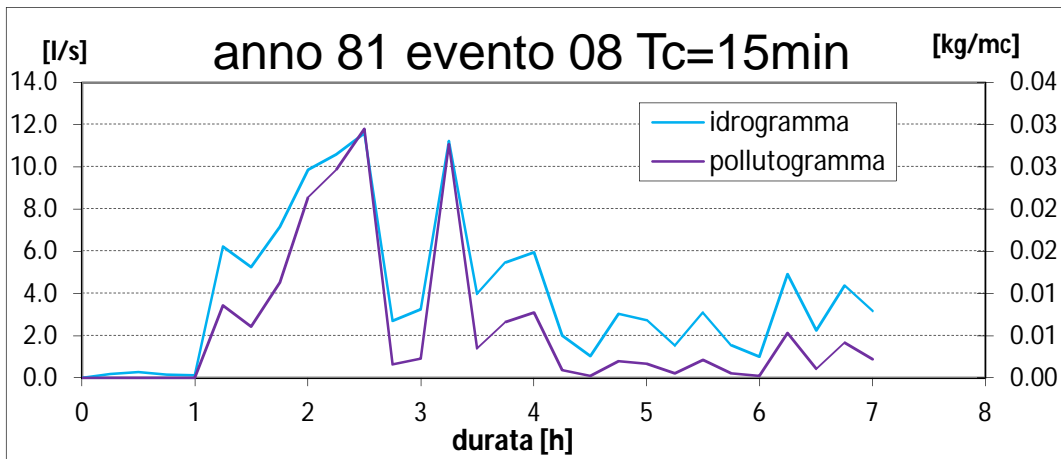
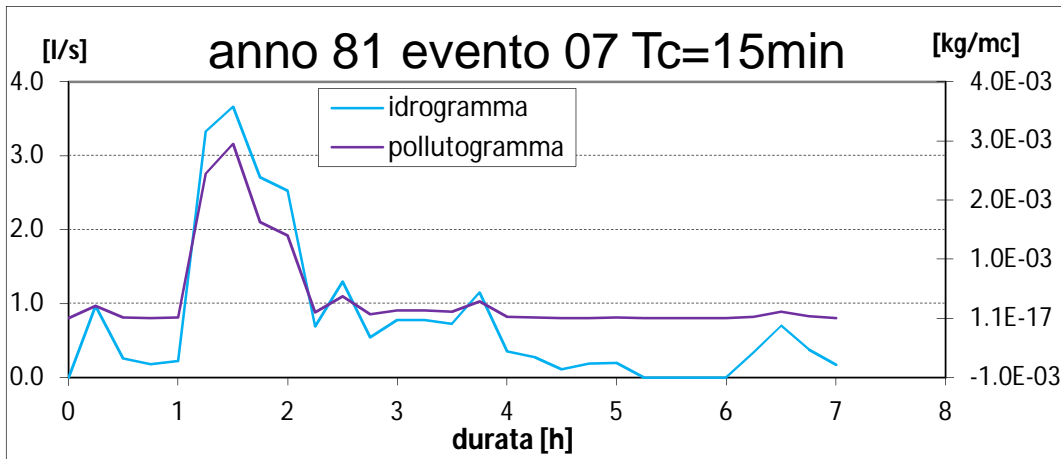
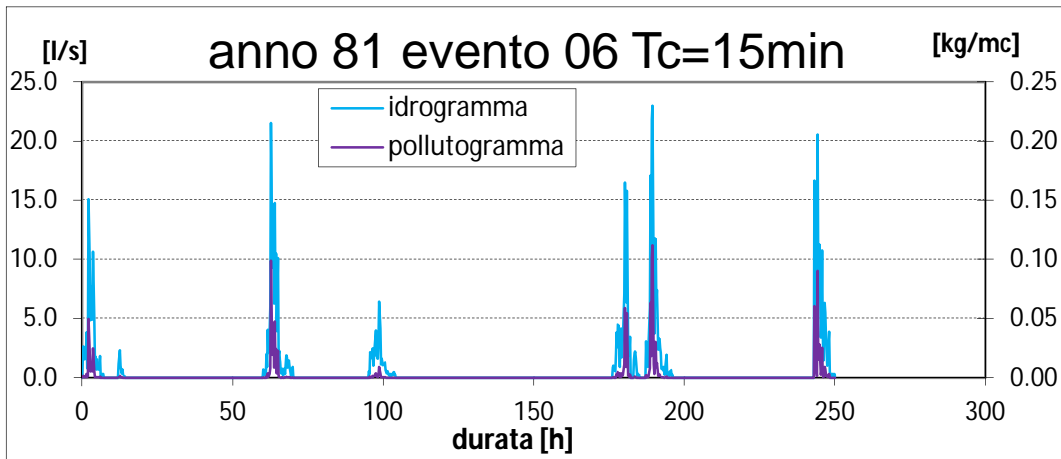
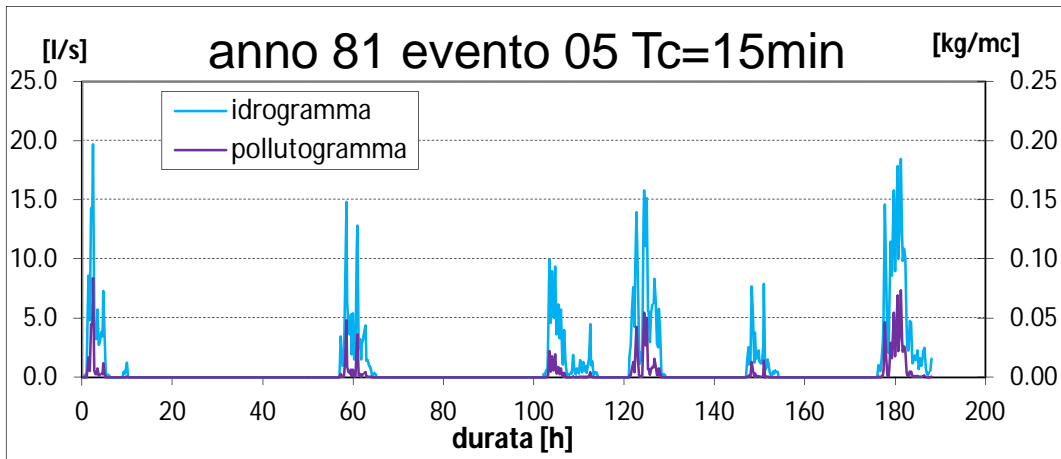




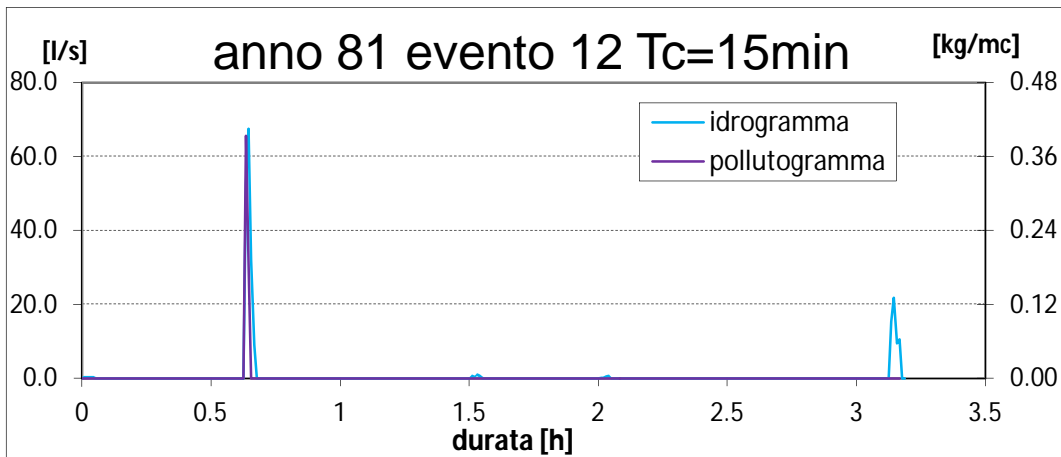
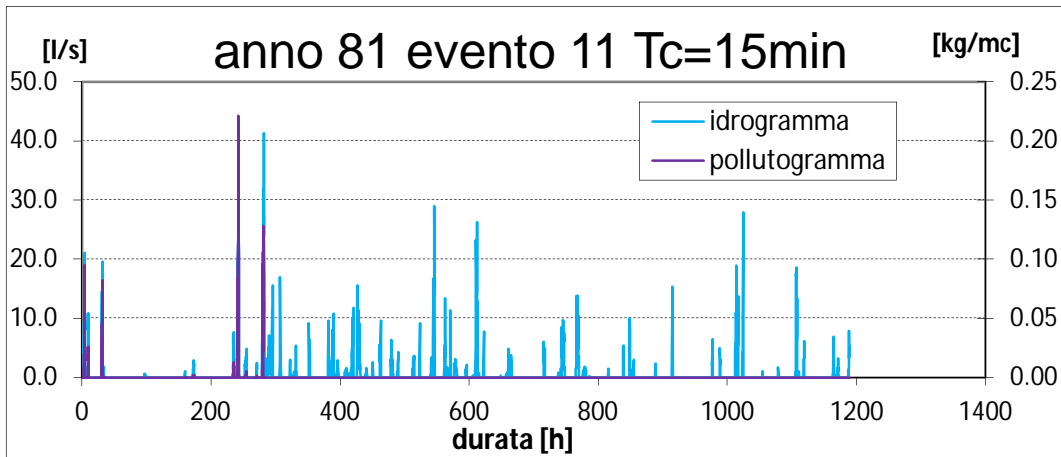
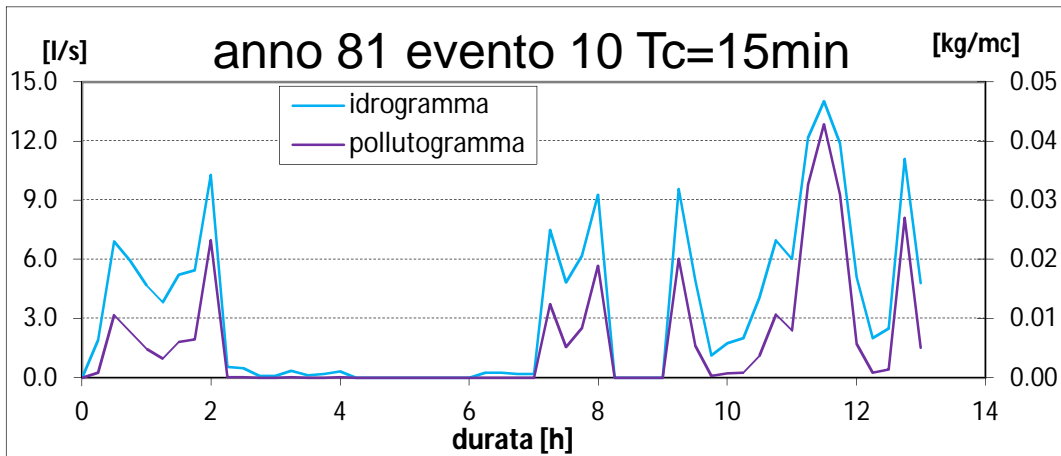
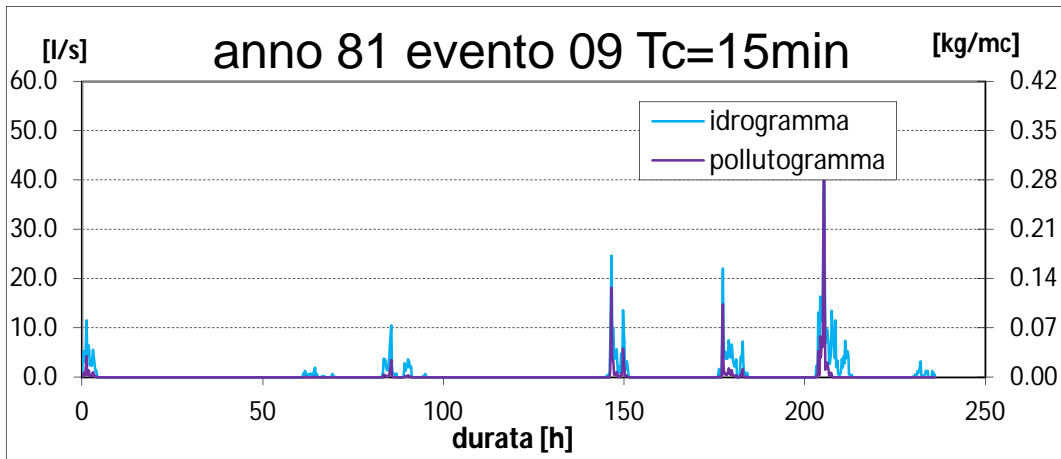
**B.2 Anno massimo: numero 81**

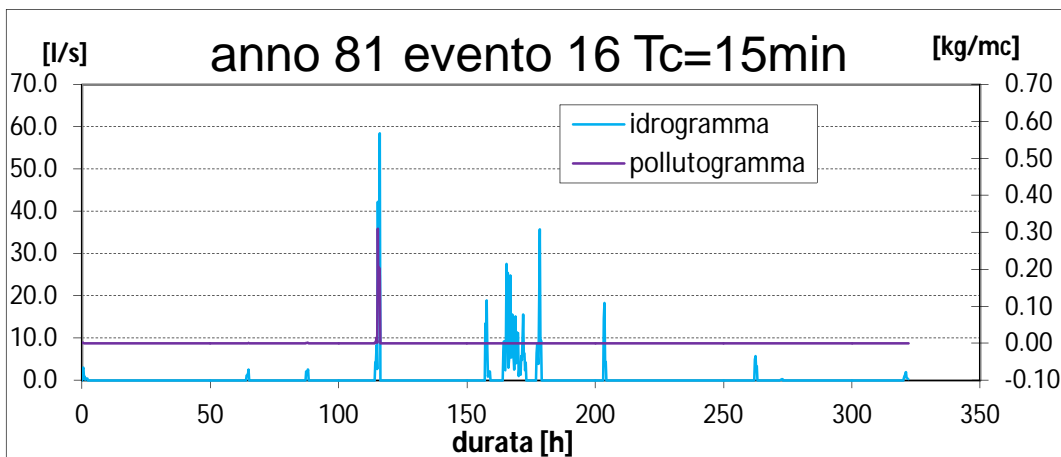
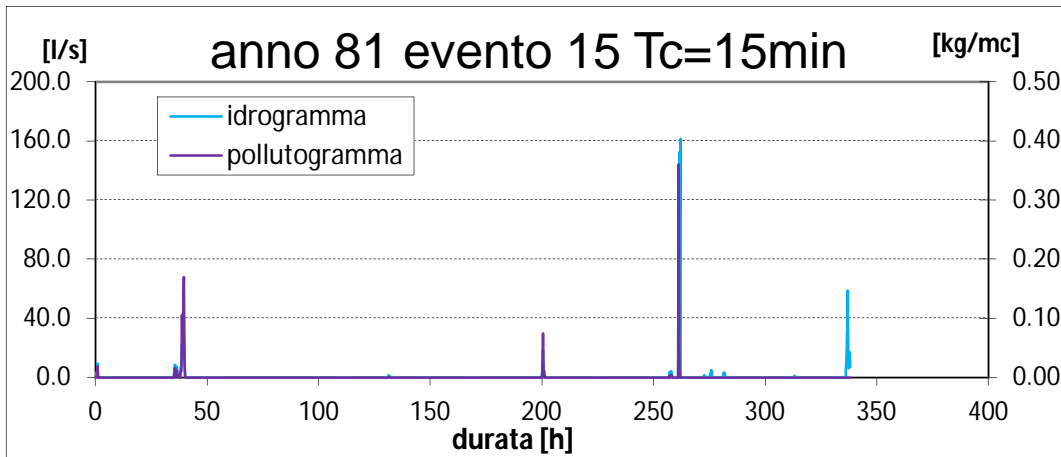
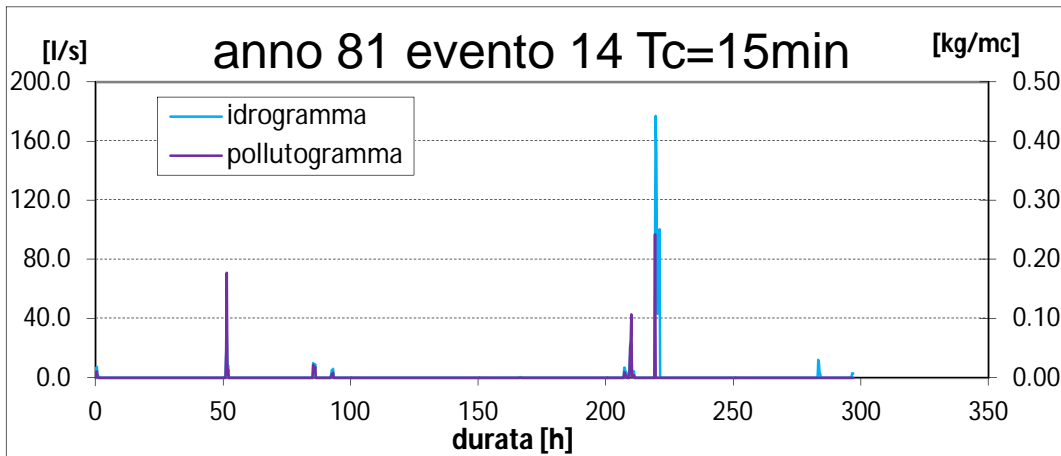
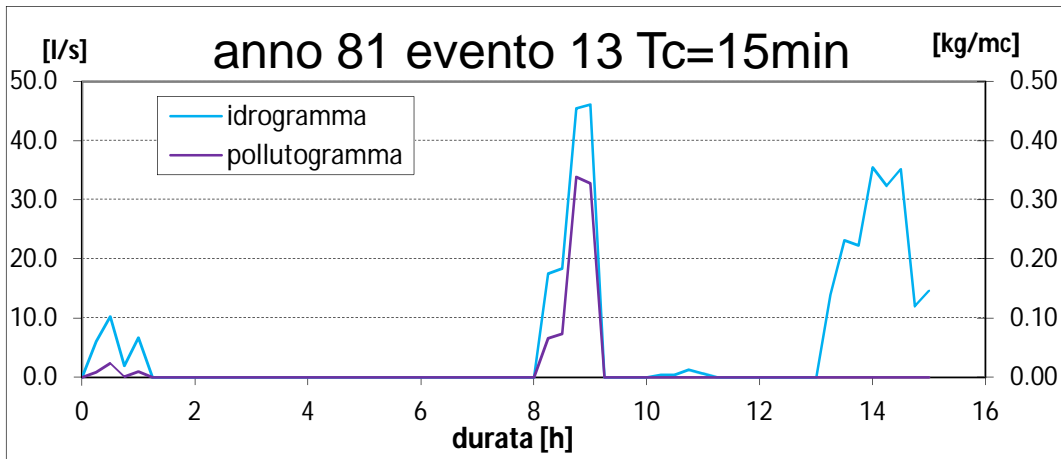
Tempo di corrivazione 15 minuti

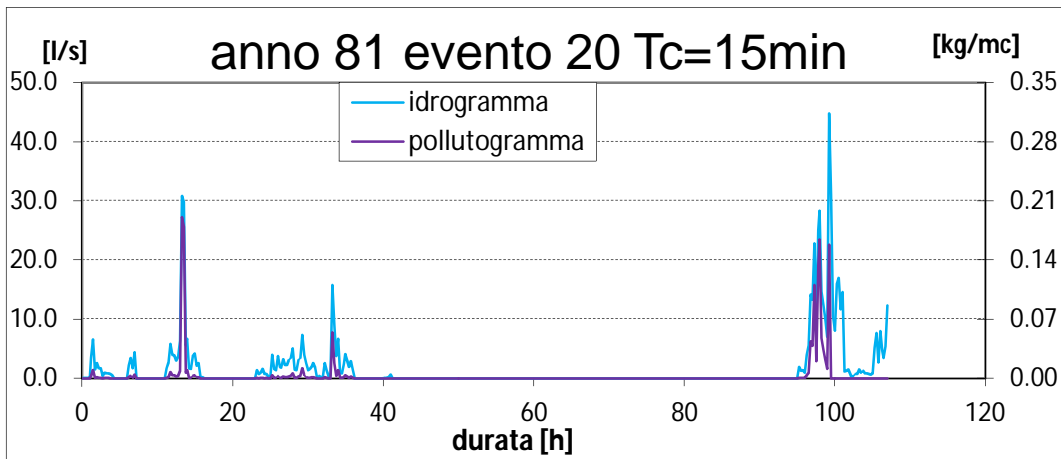
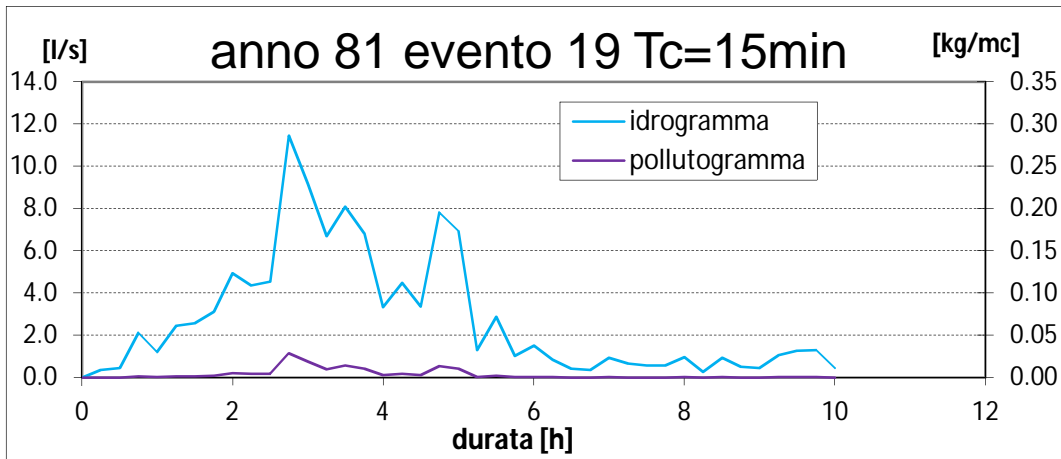
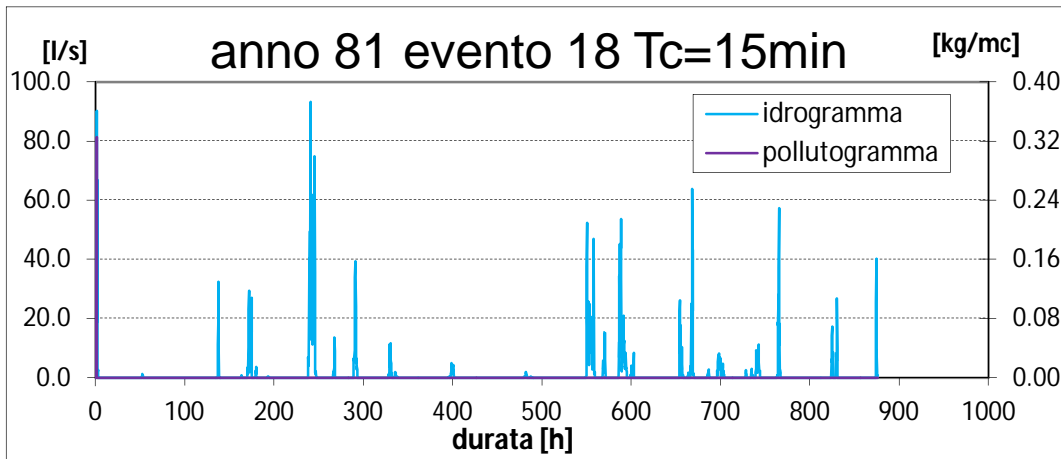
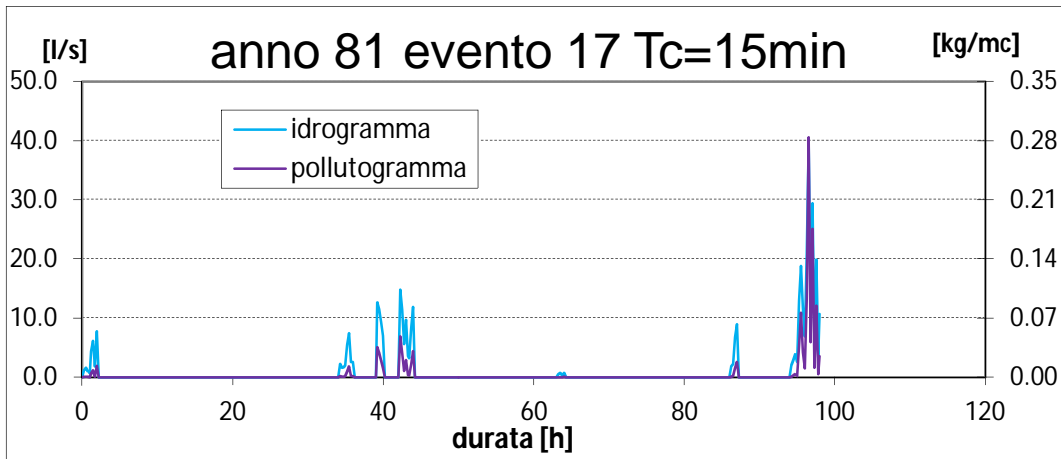


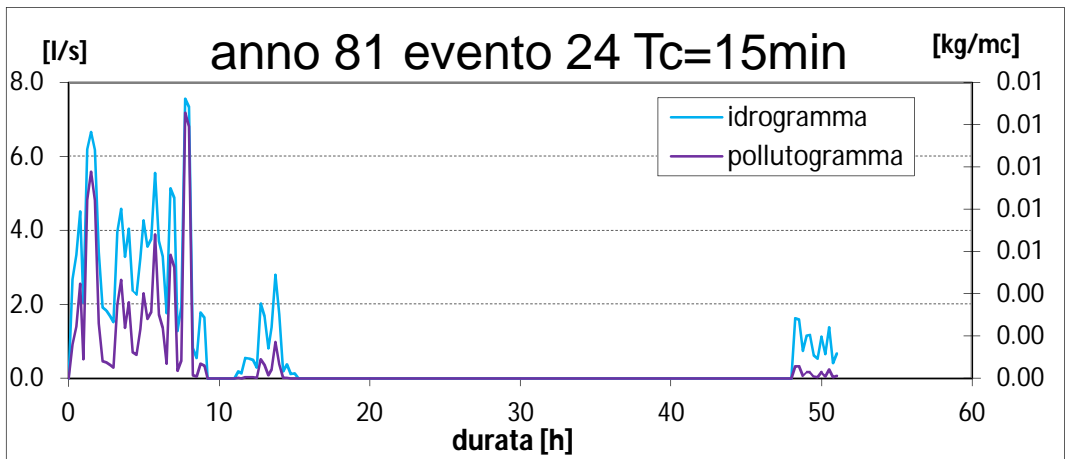
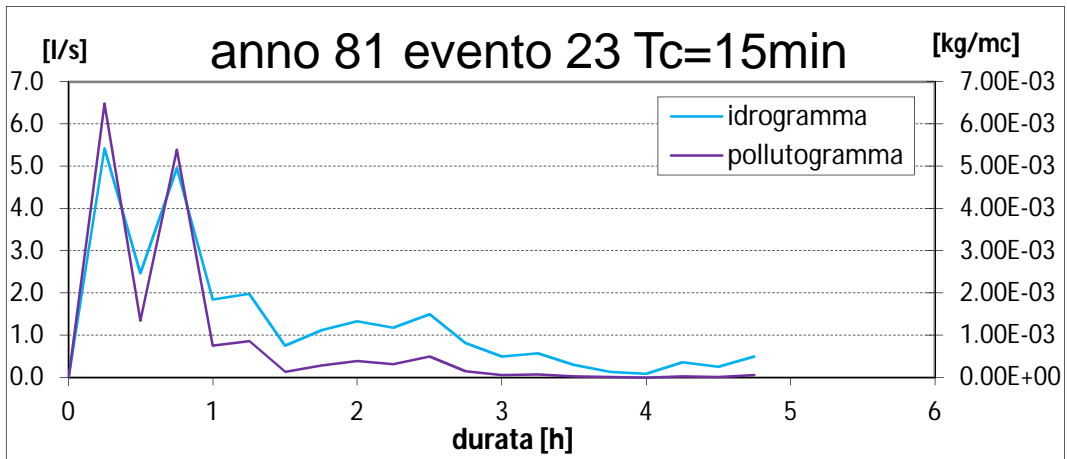
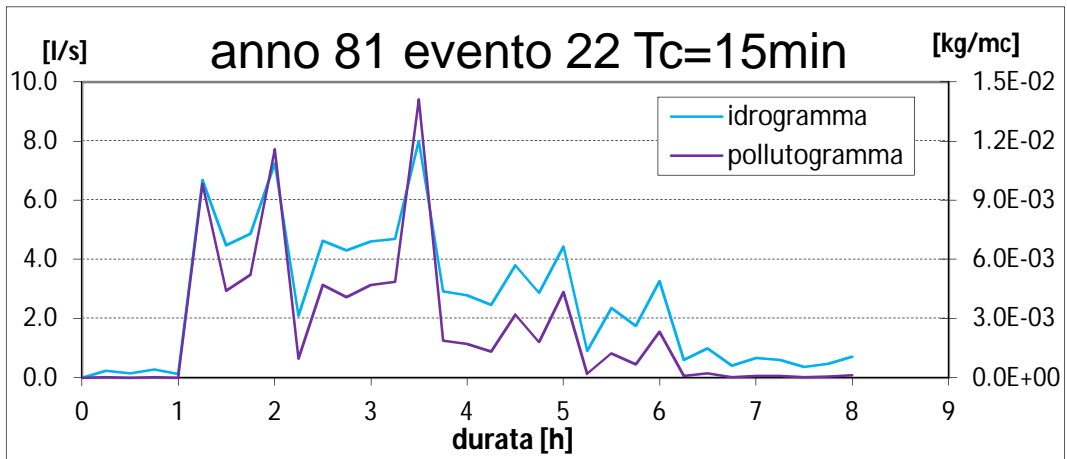
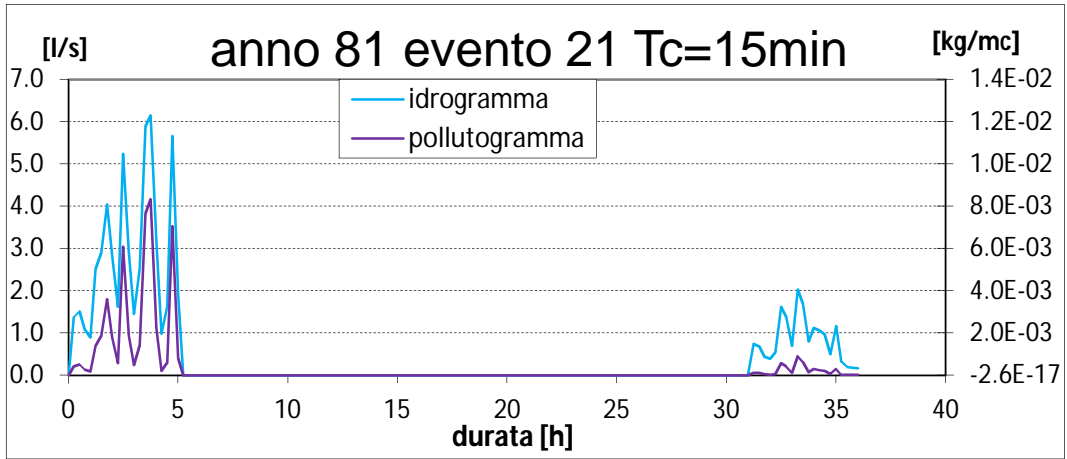




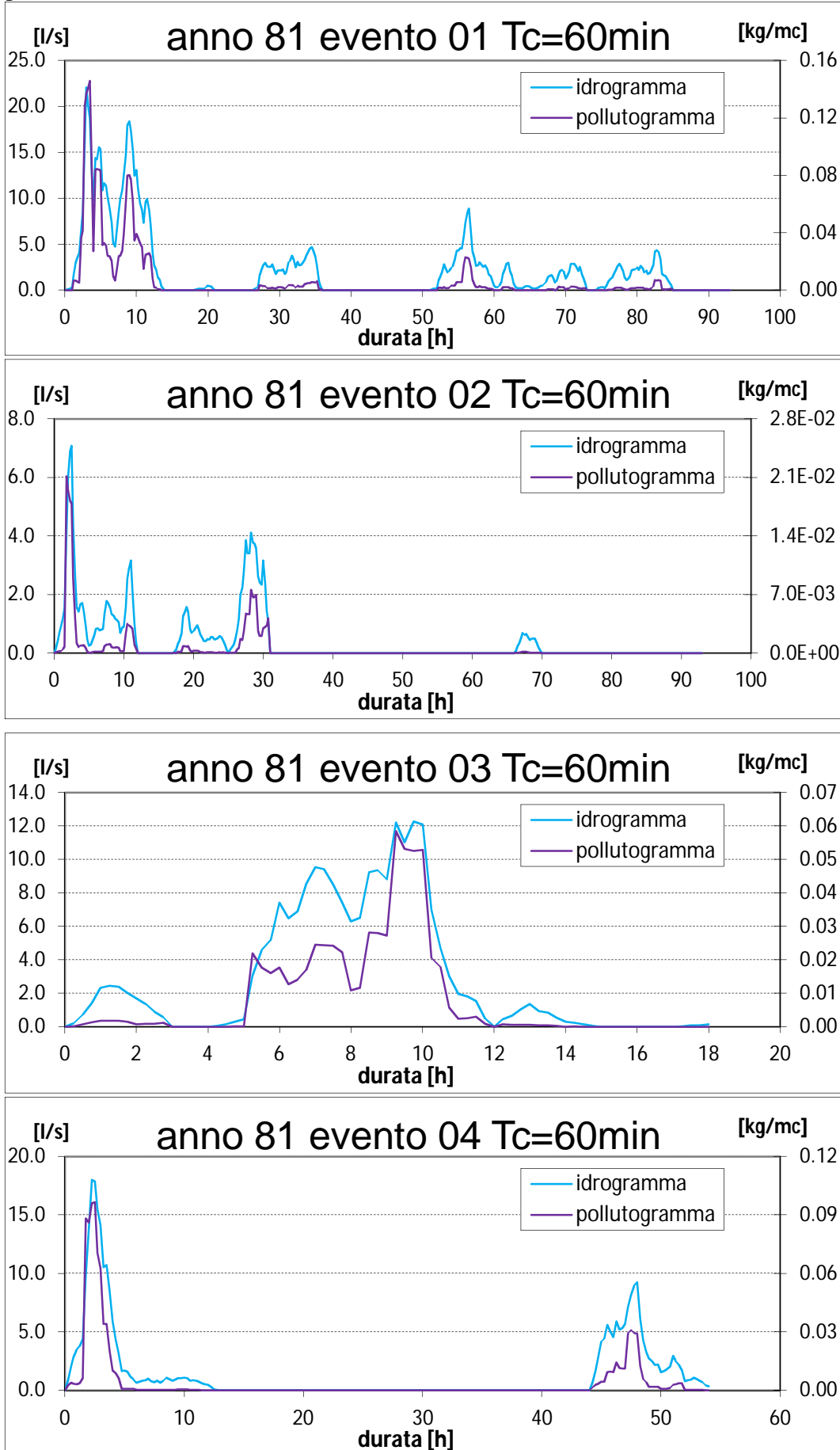


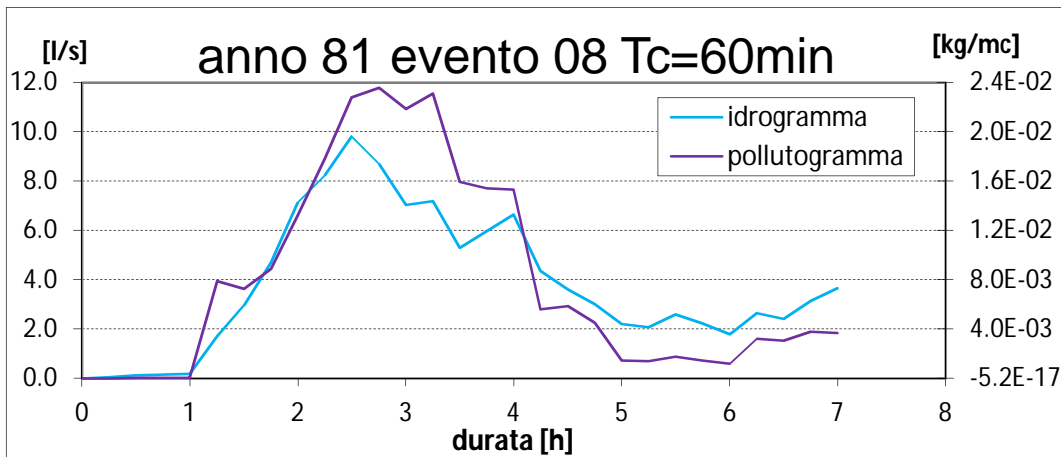
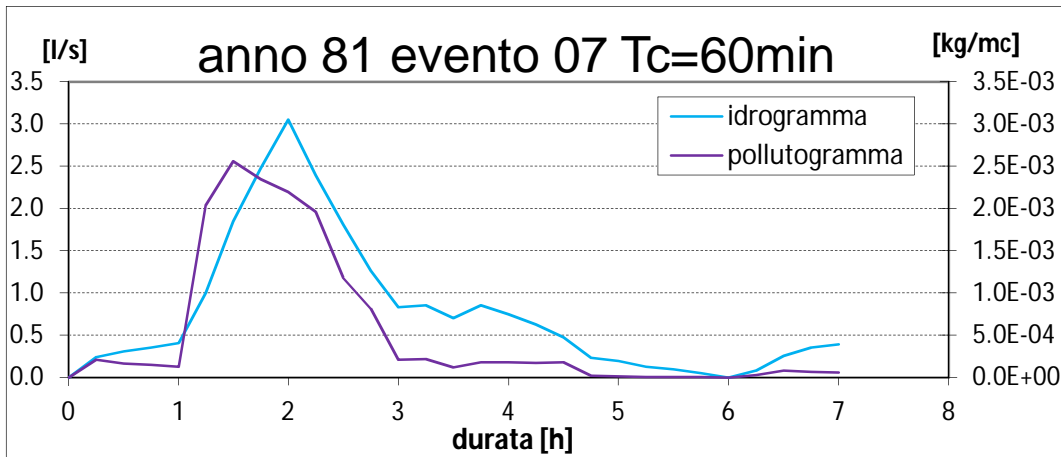
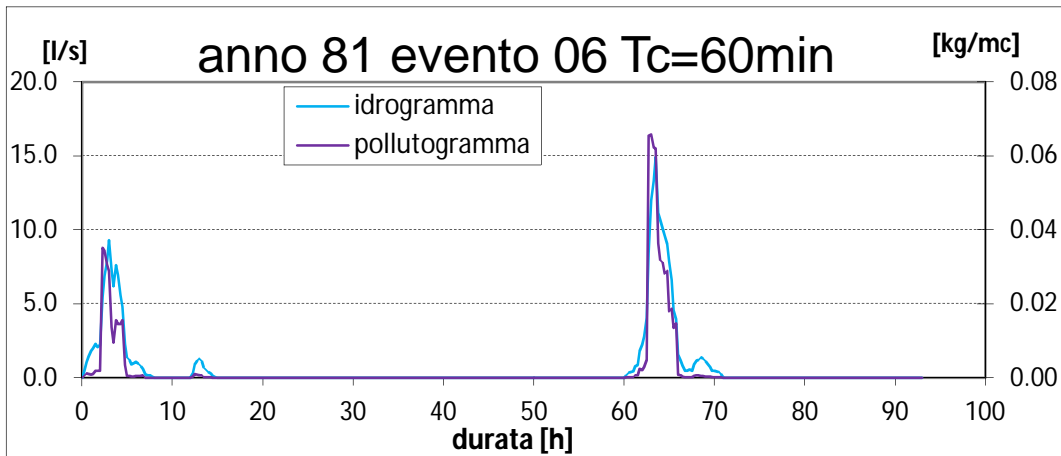
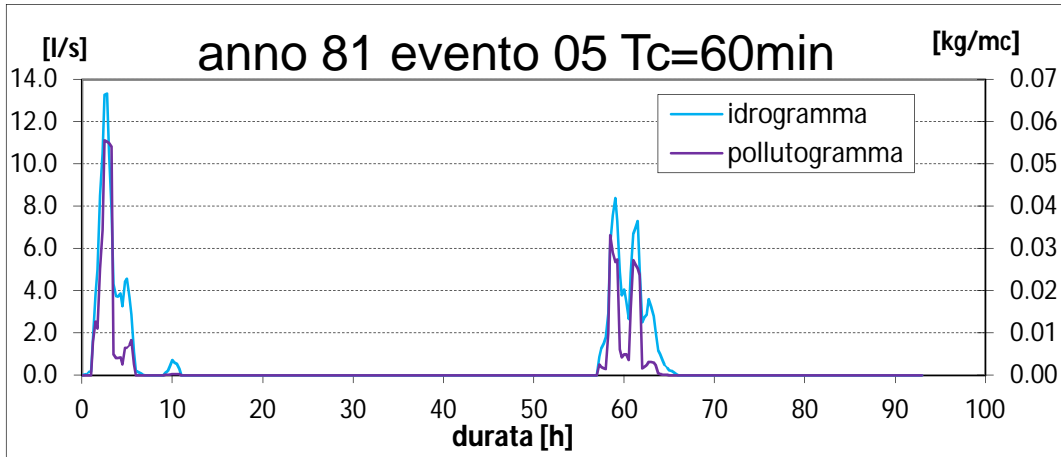


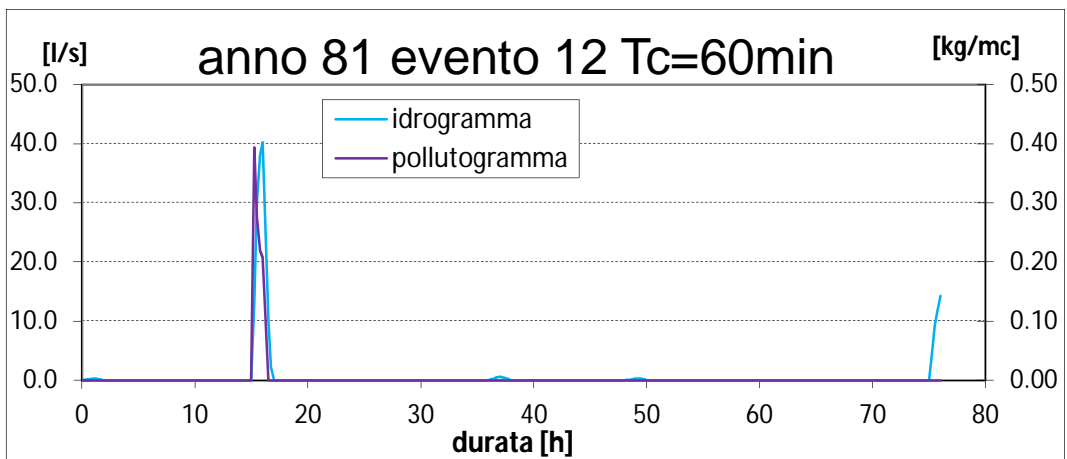
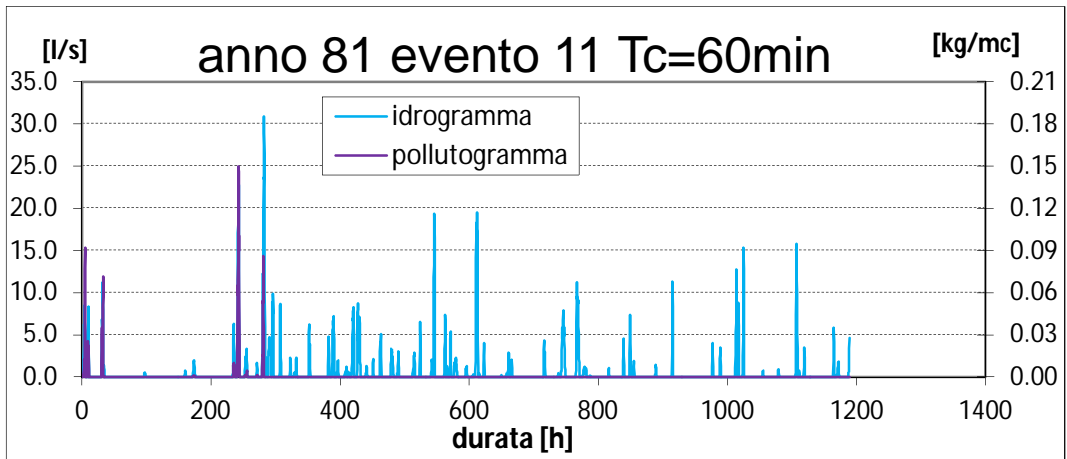
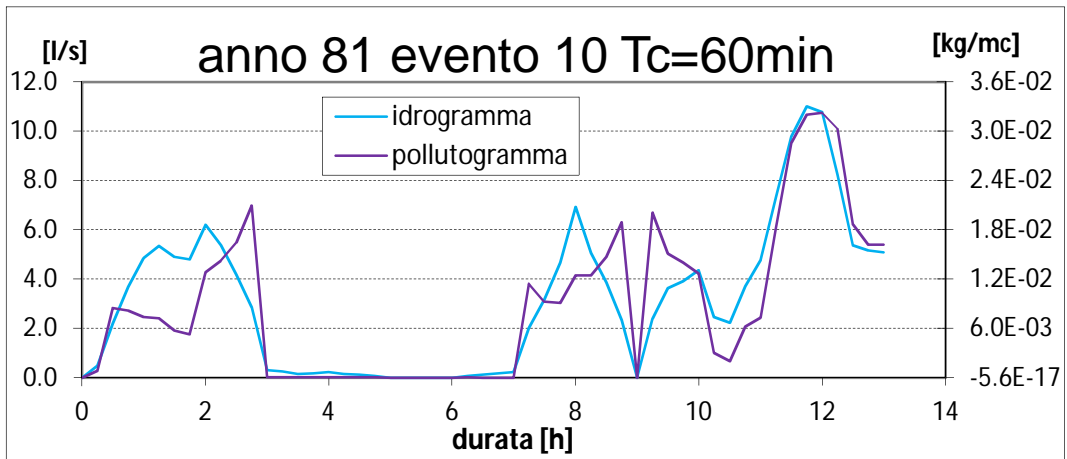
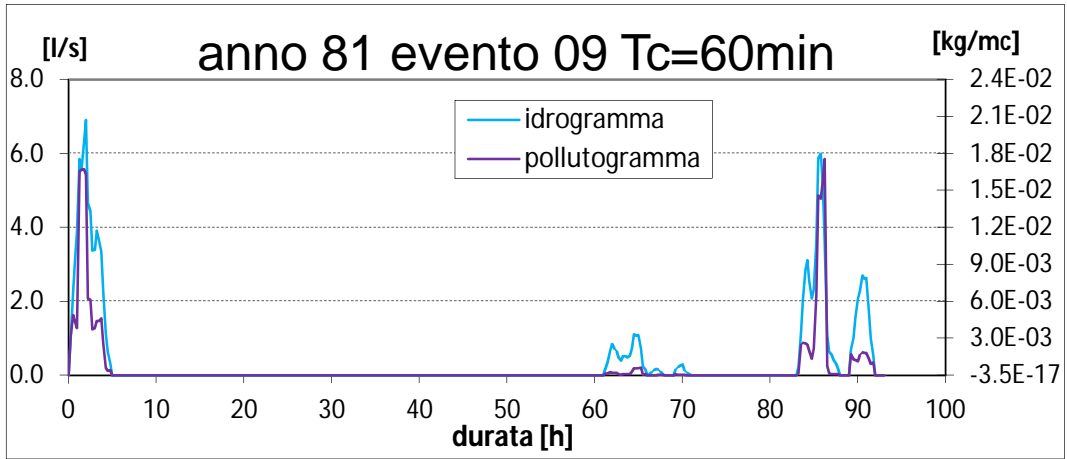


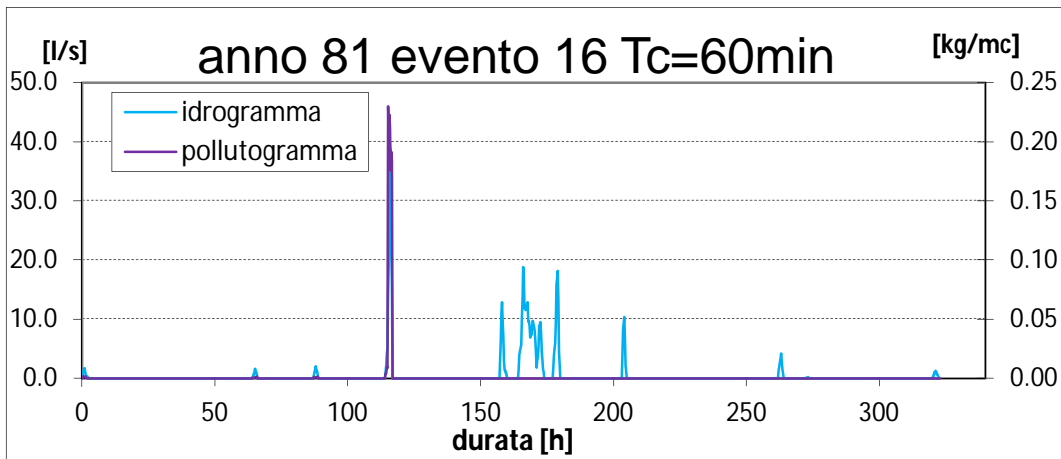
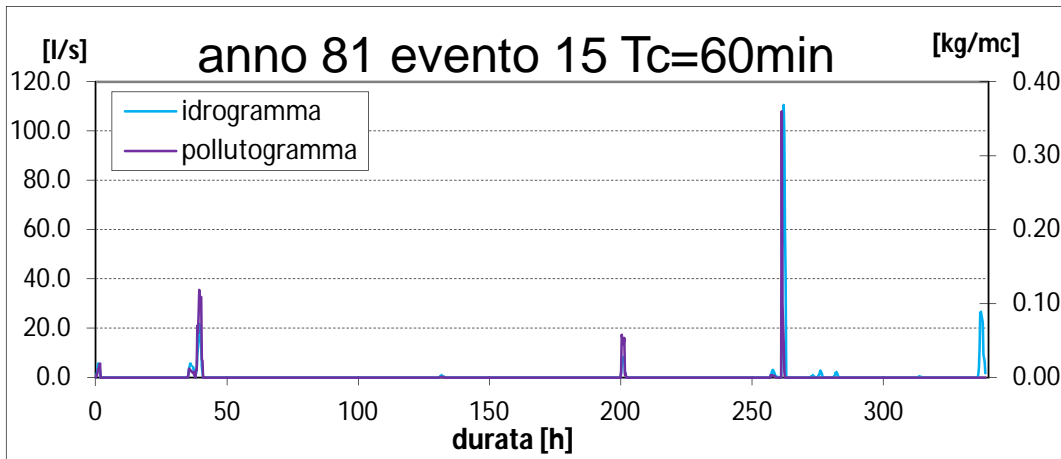
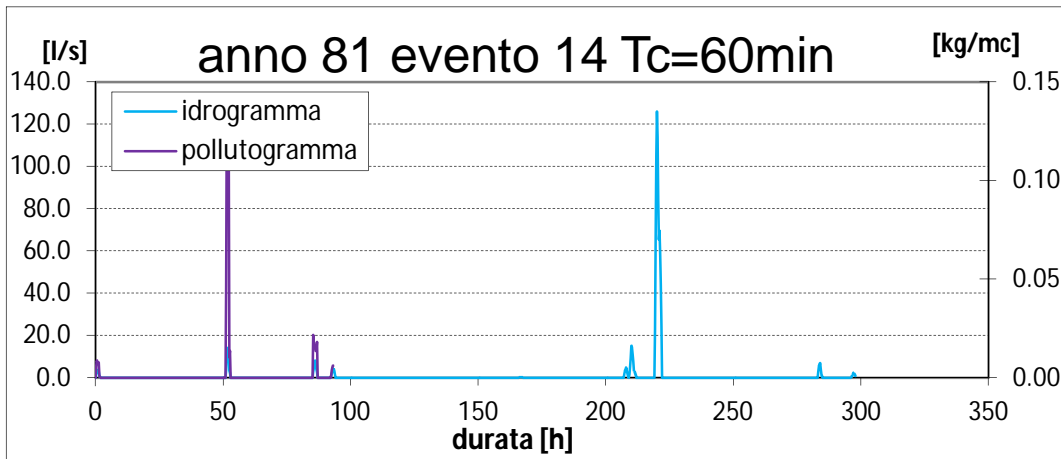
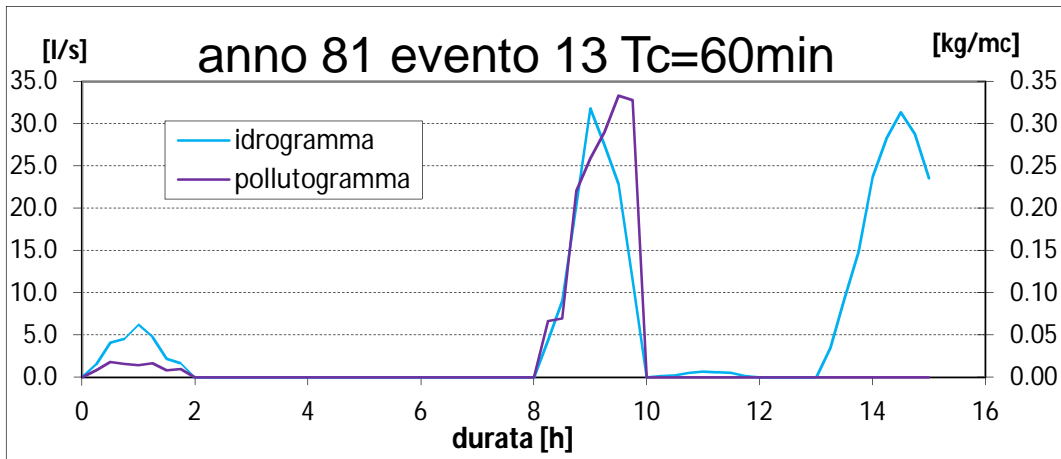


Tempo di corrivazione 60 minuti

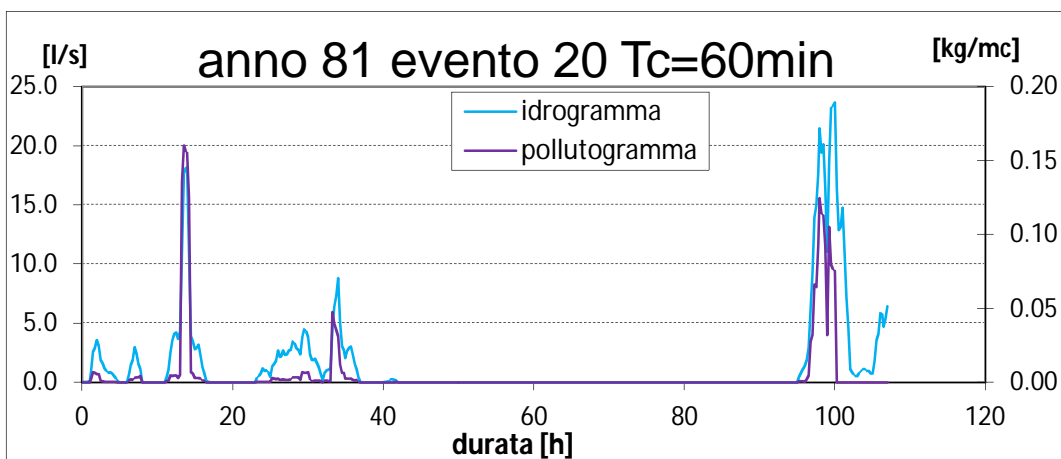
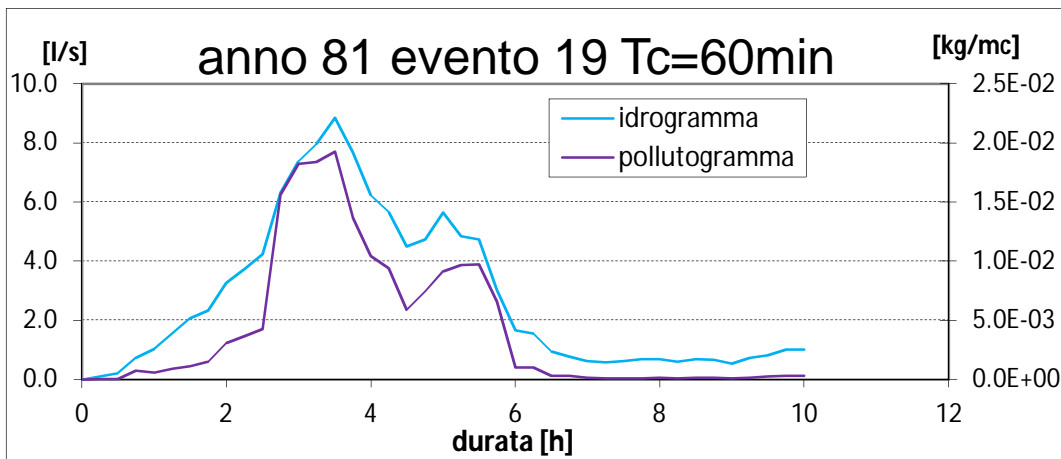
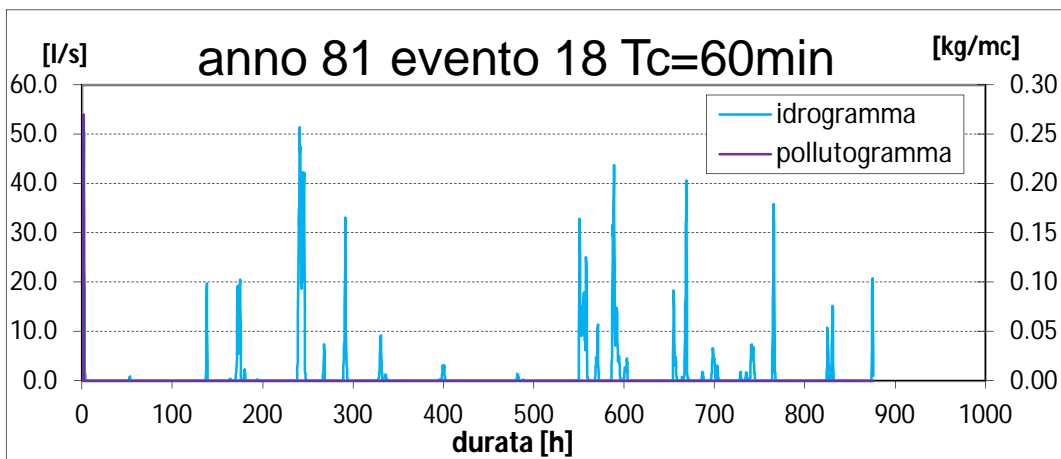
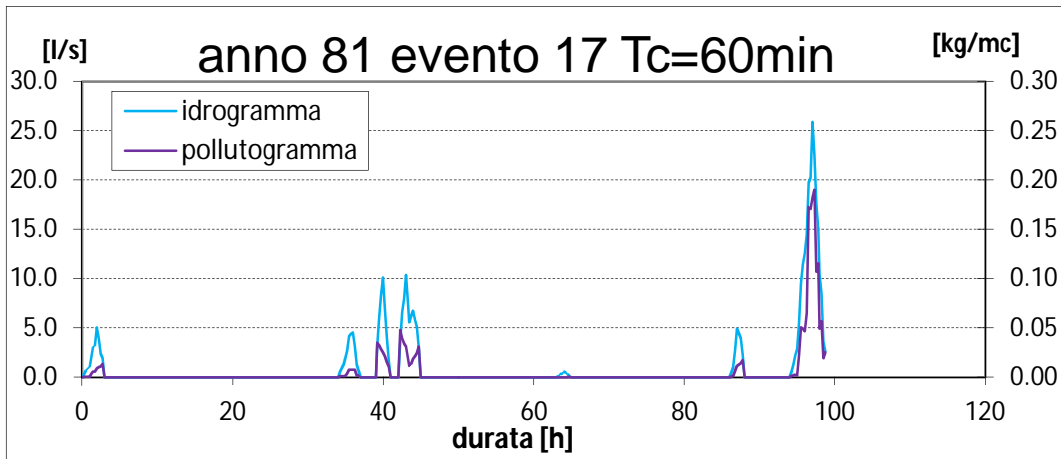


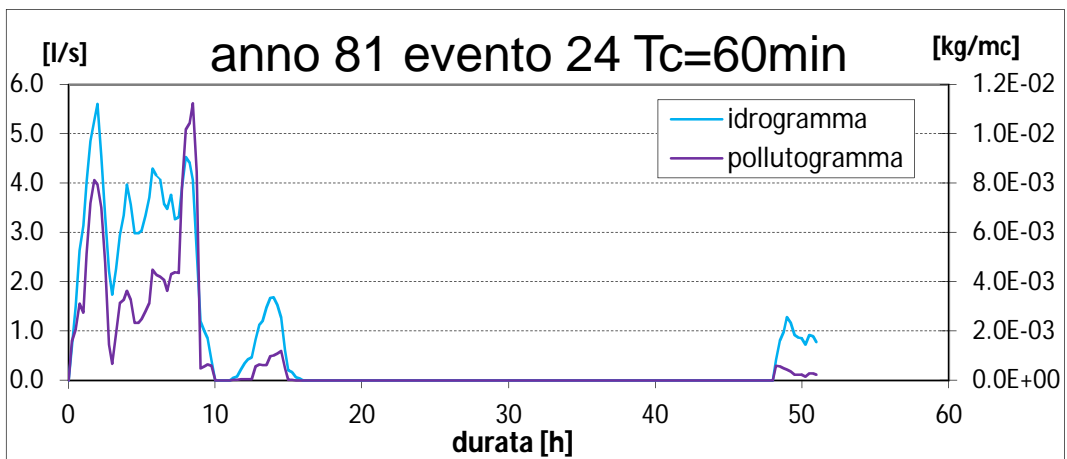
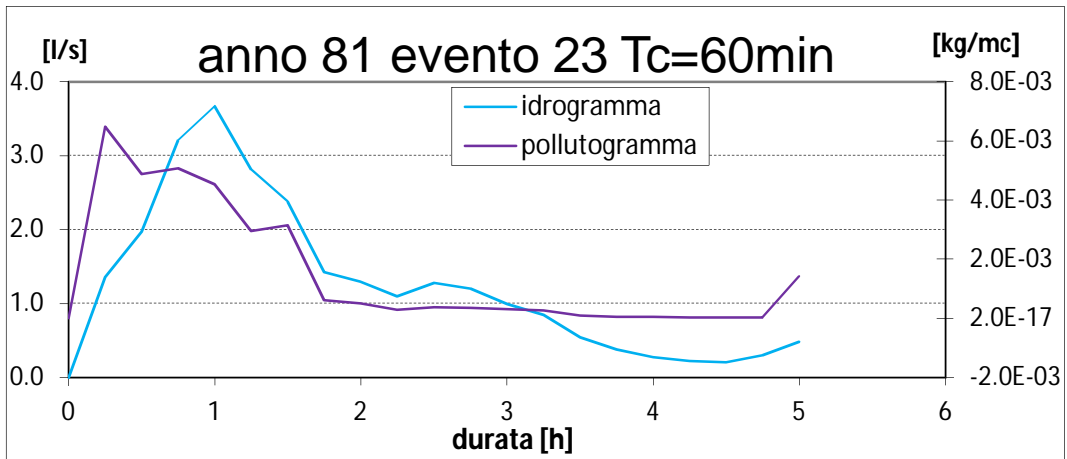
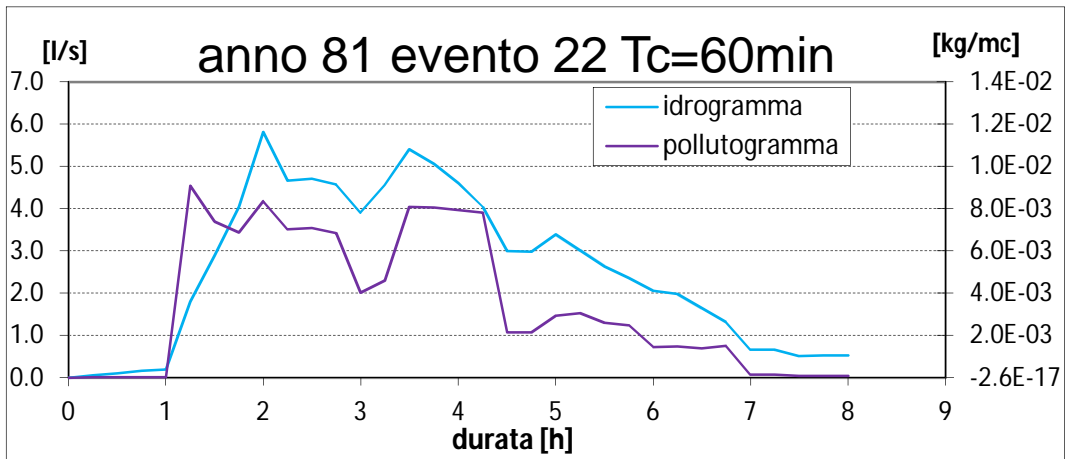
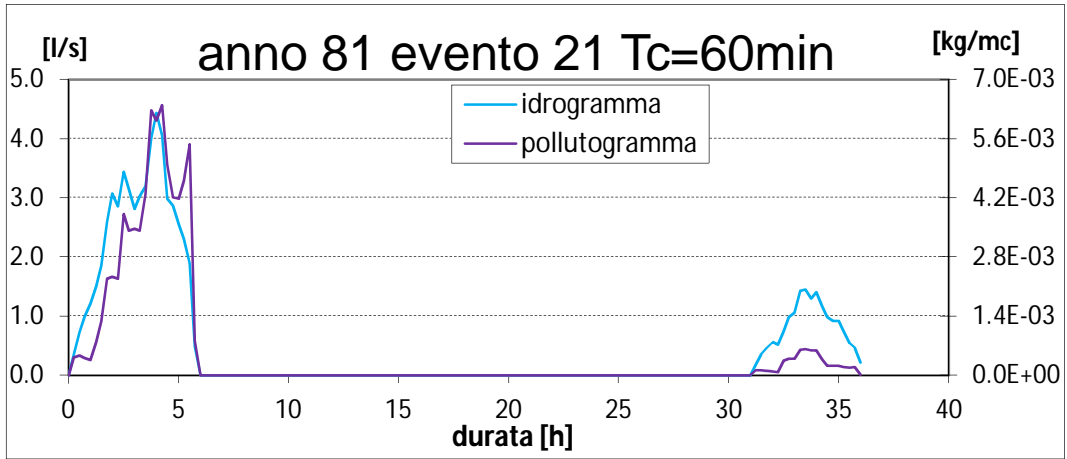






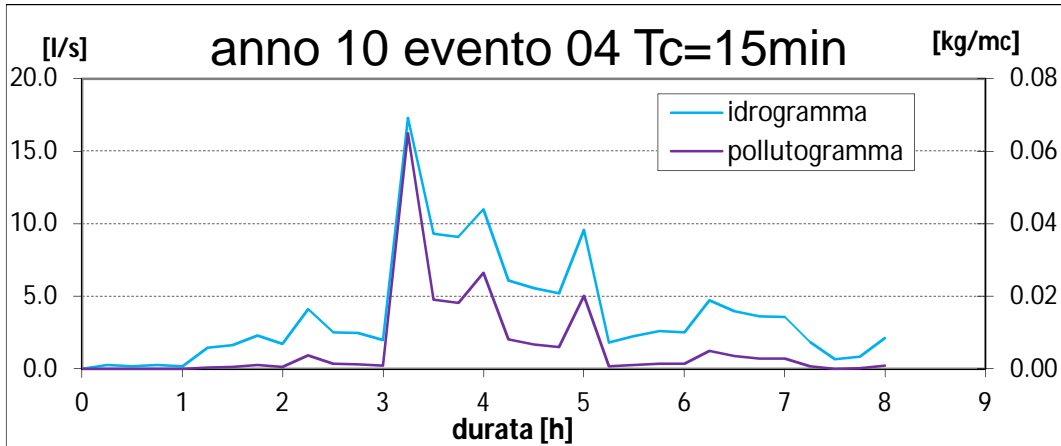
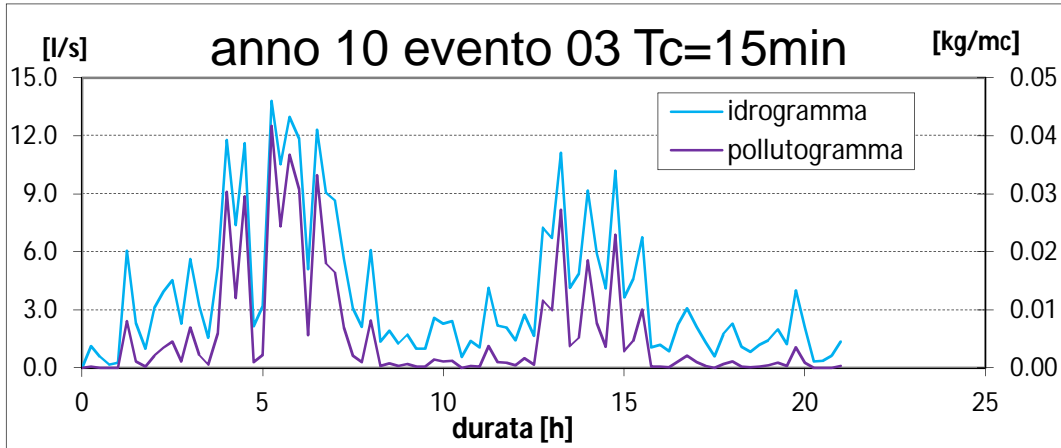
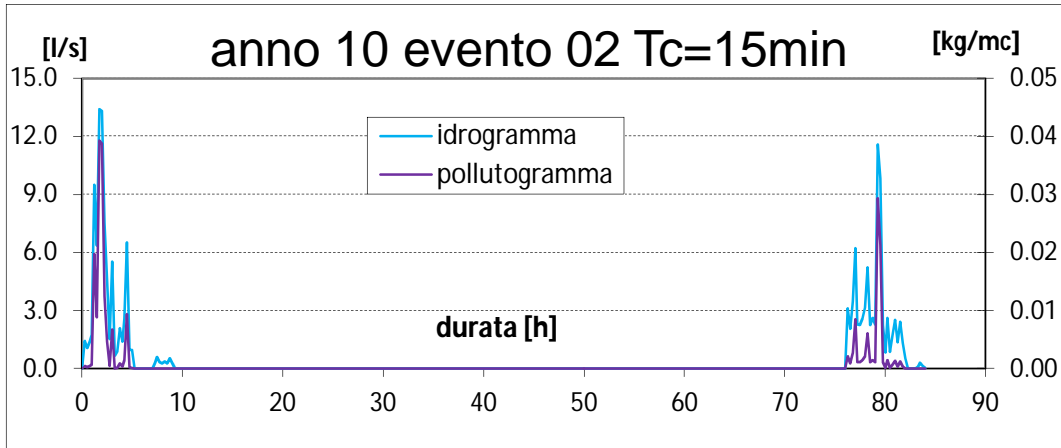
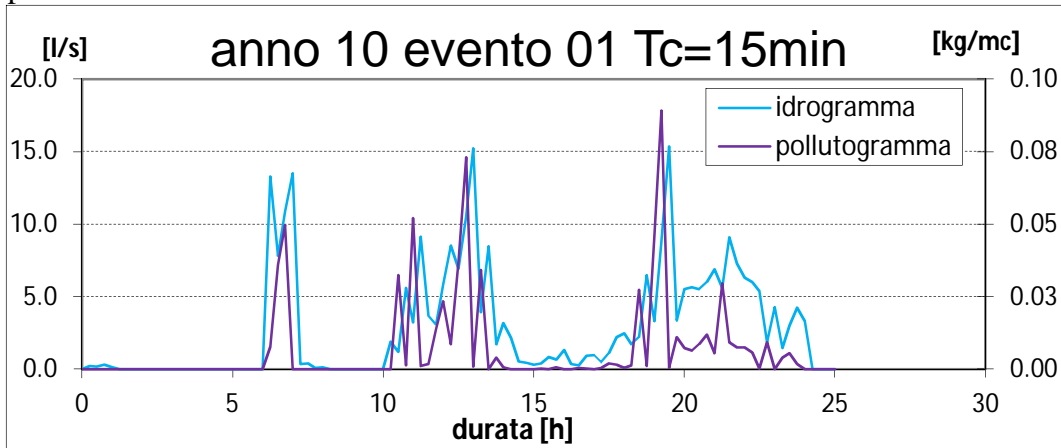


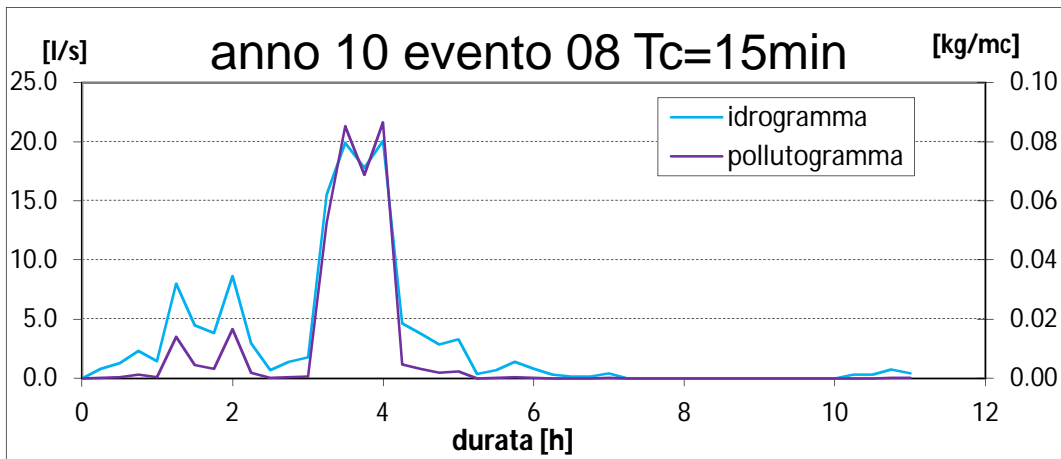
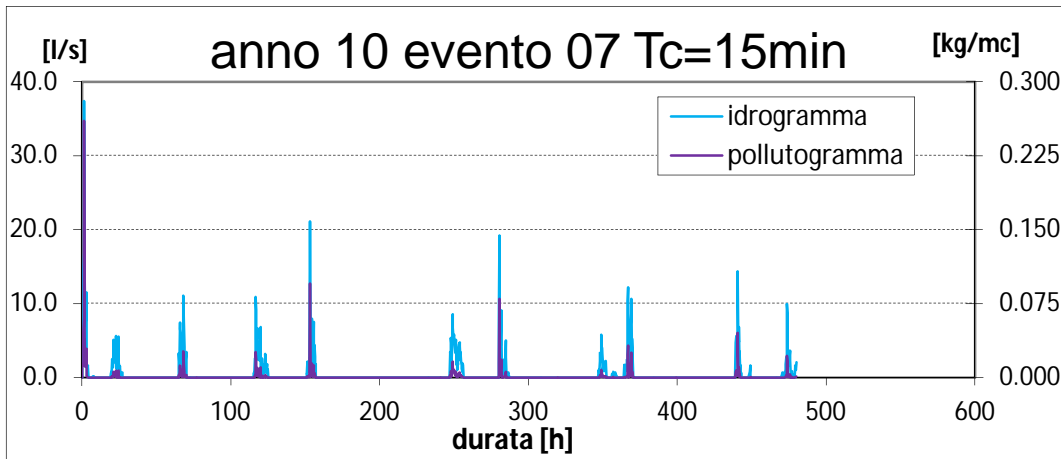
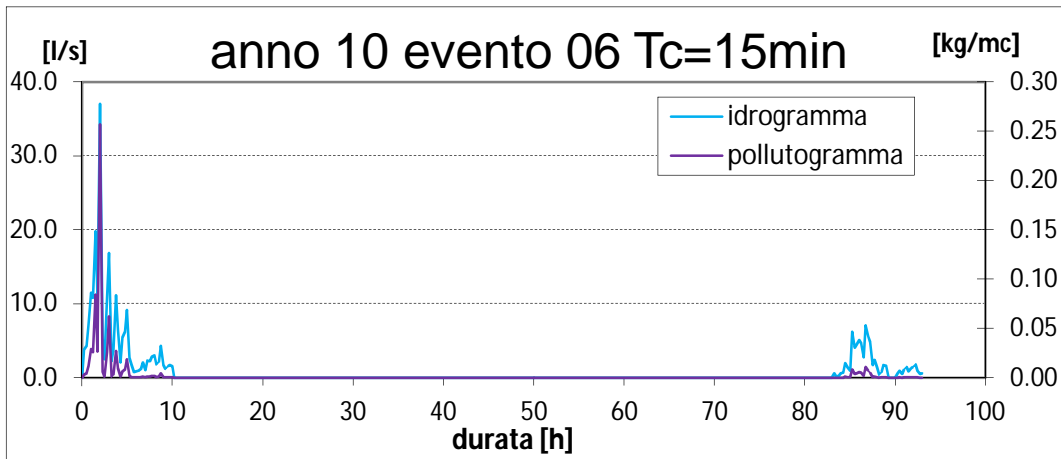
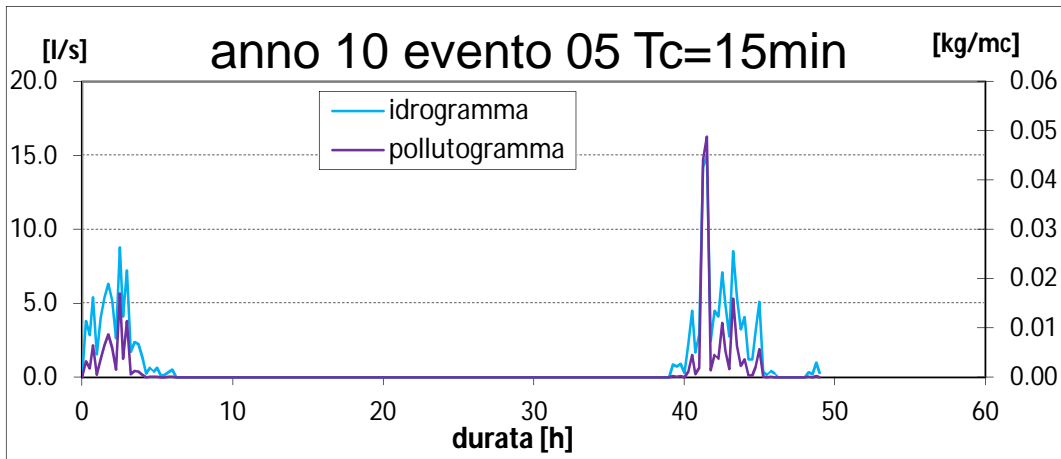


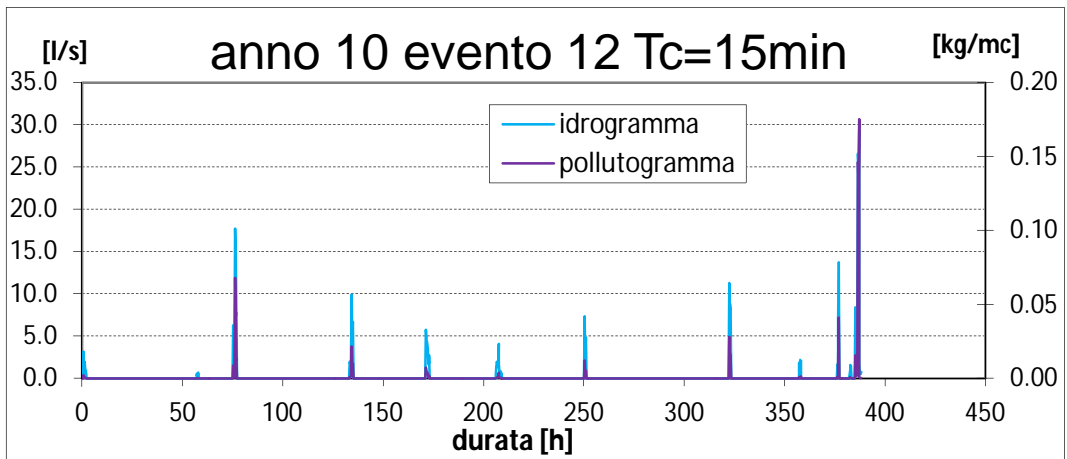
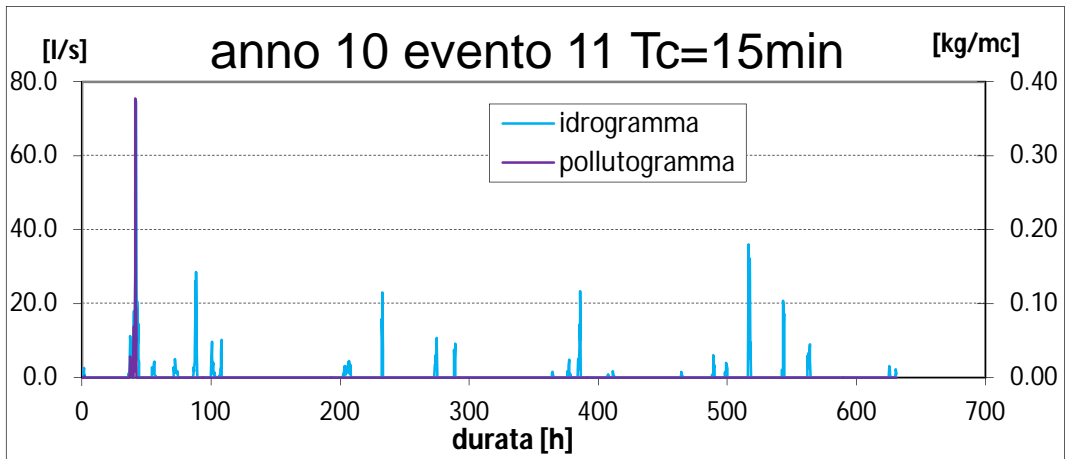
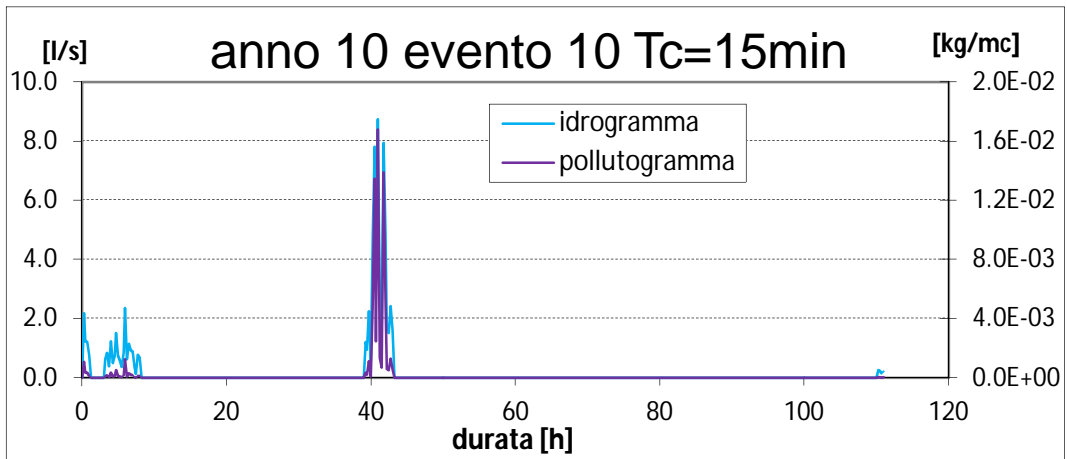
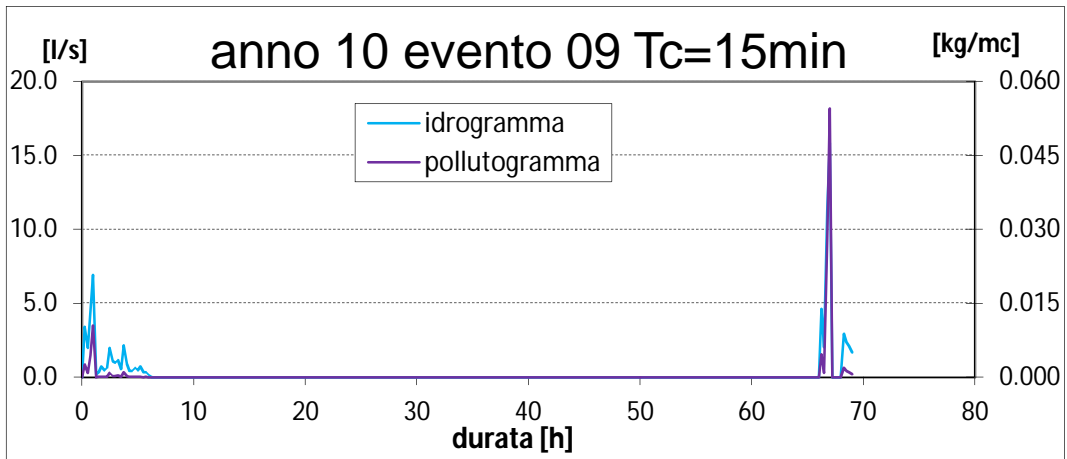


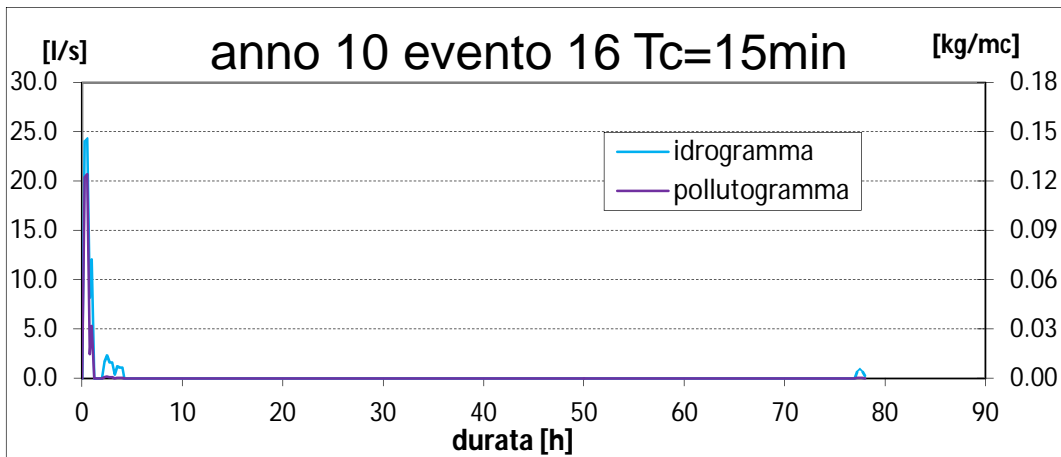
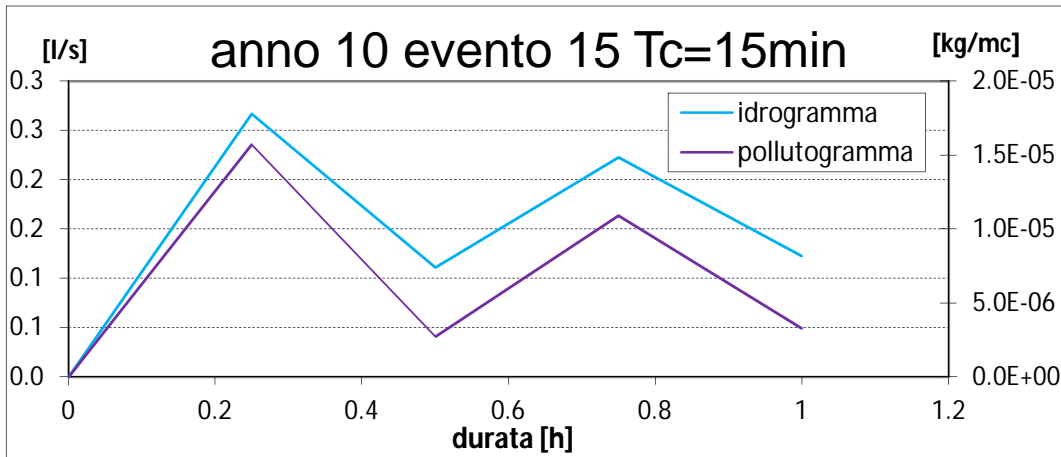
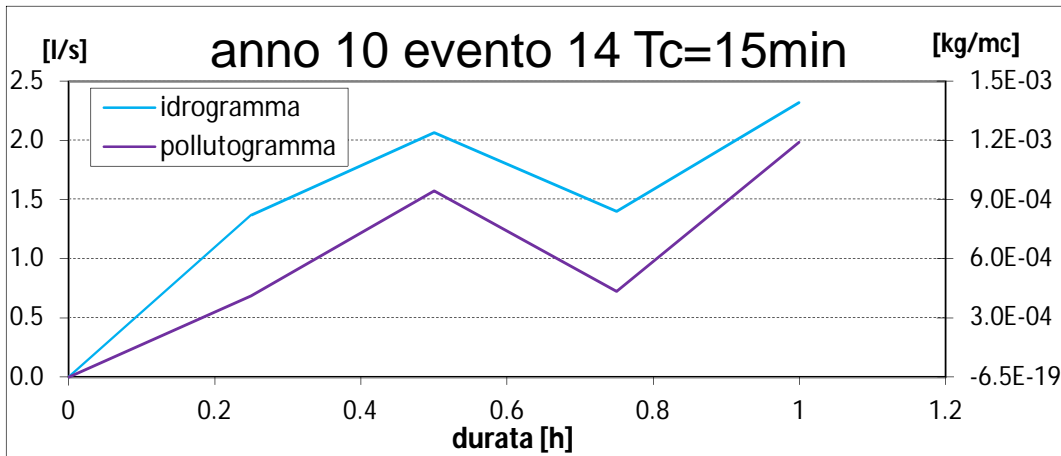
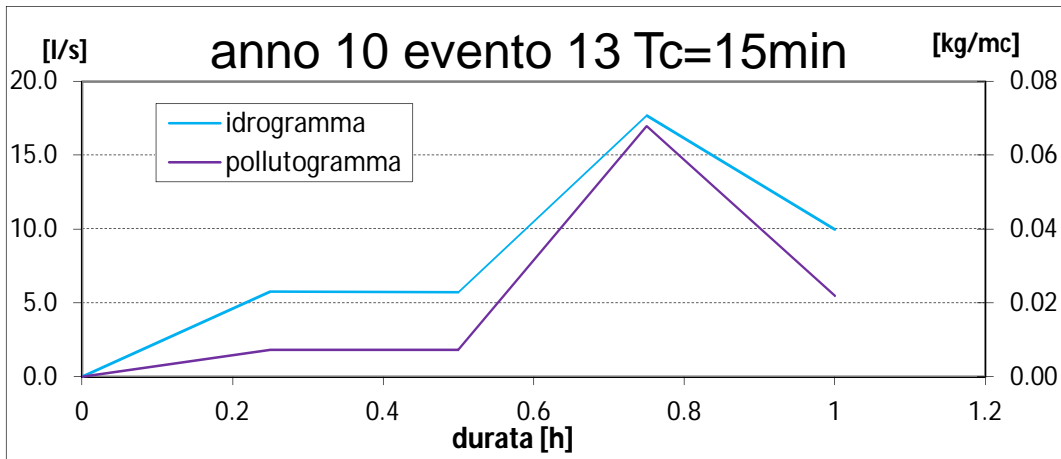
**B.3 Anno minimo: numero 10**

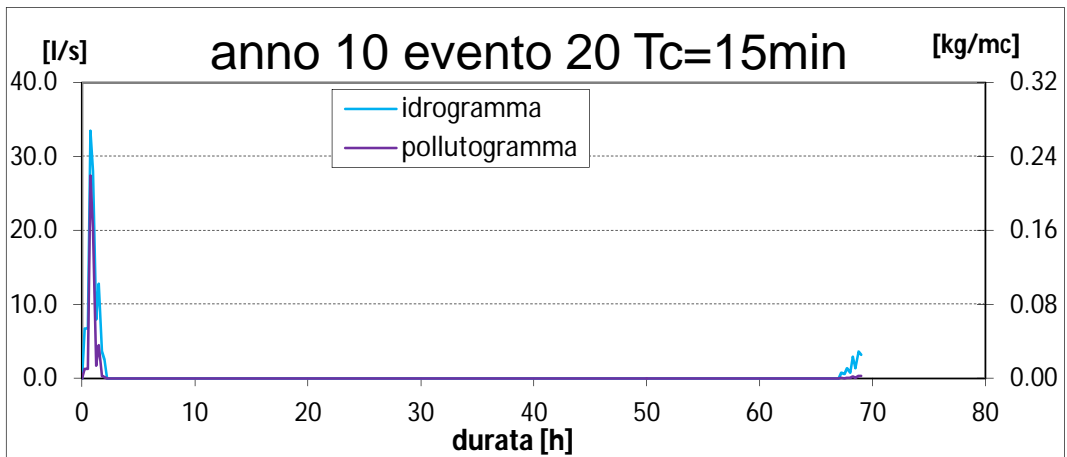
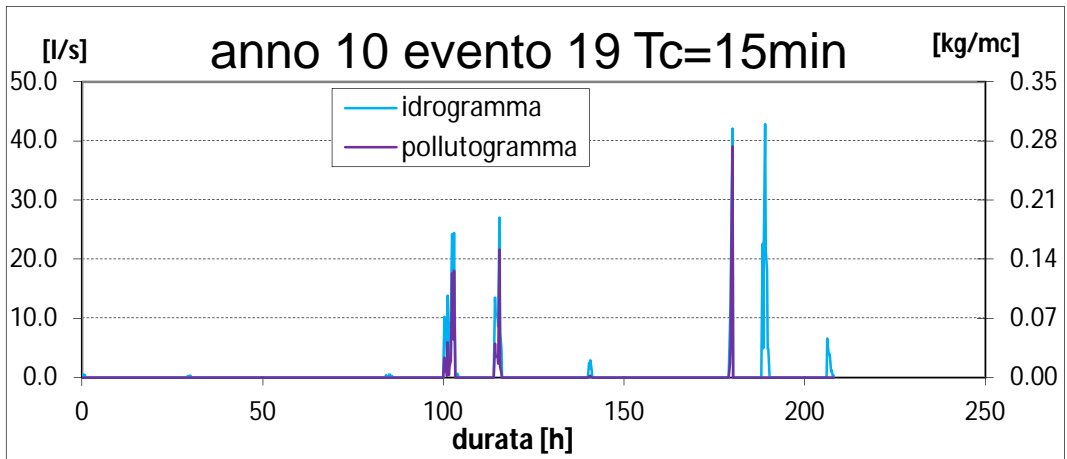
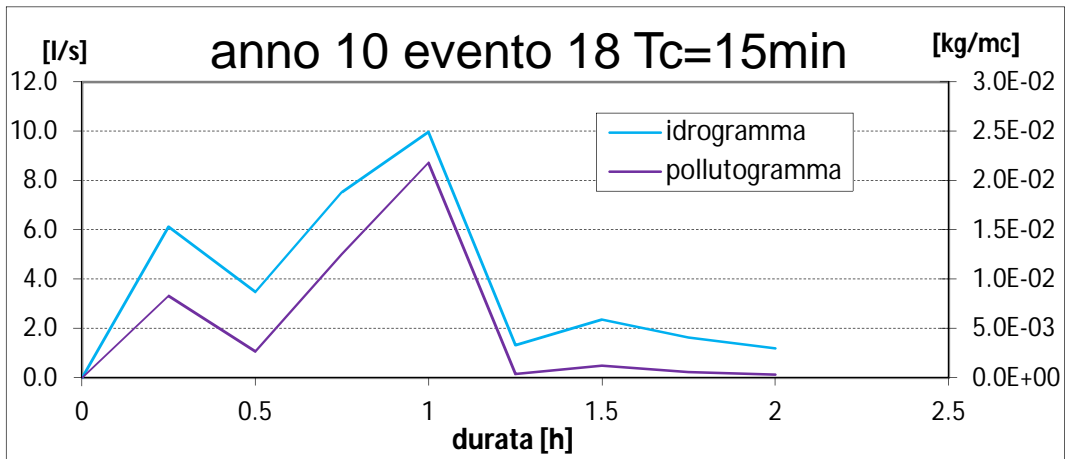
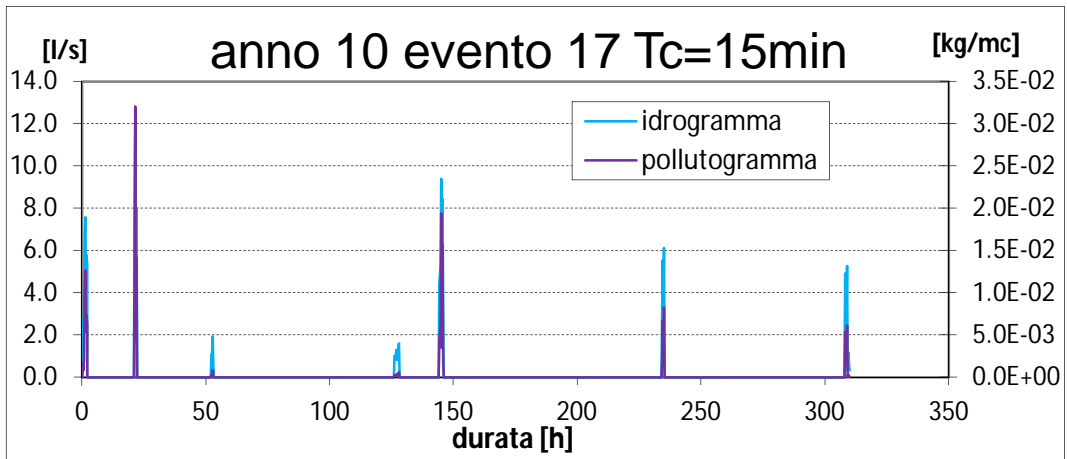
Tempo di corrivazione 15 minuti

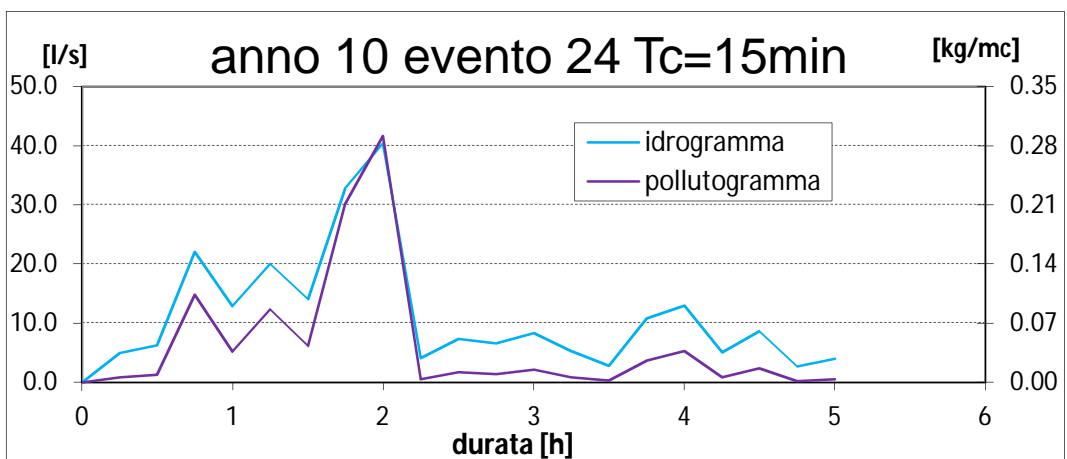
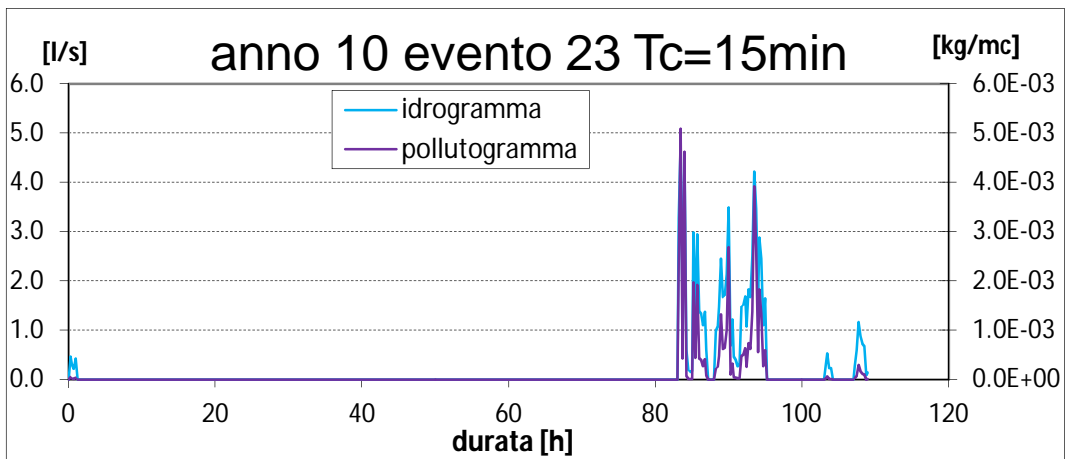
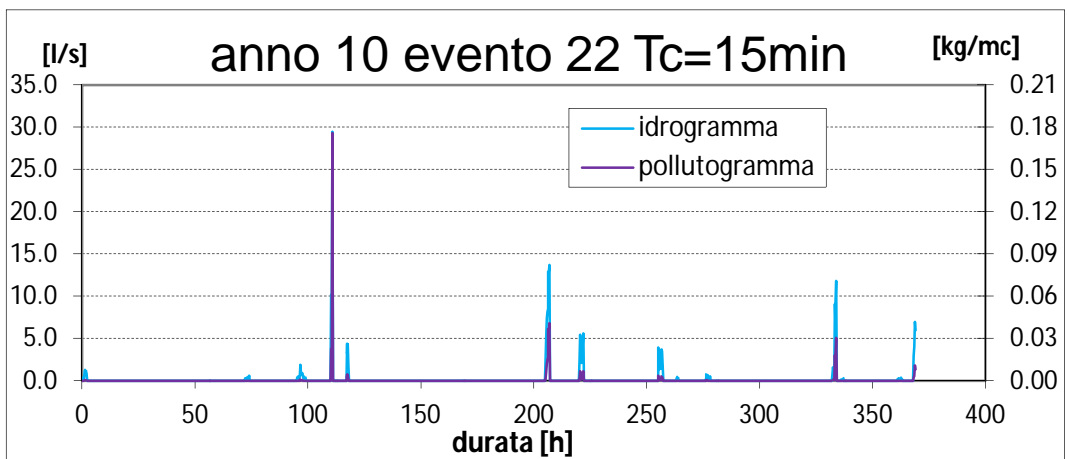
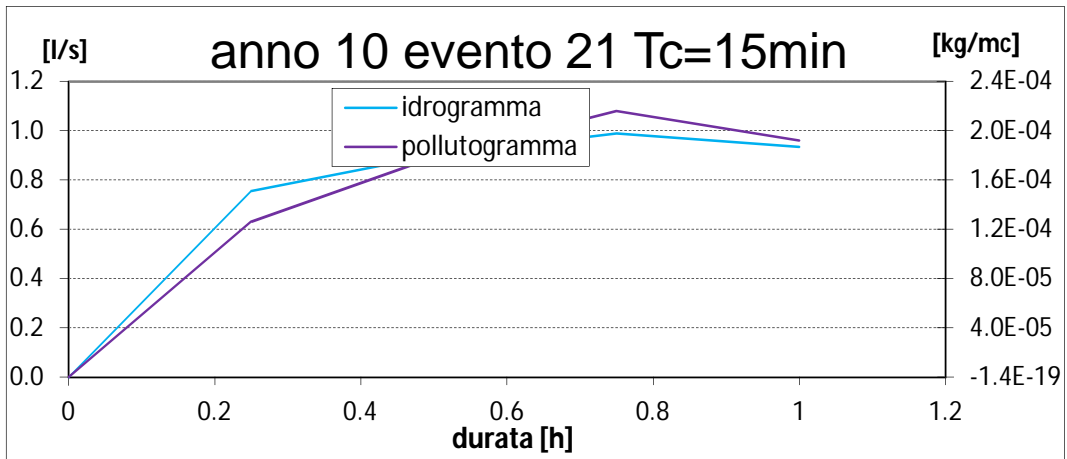




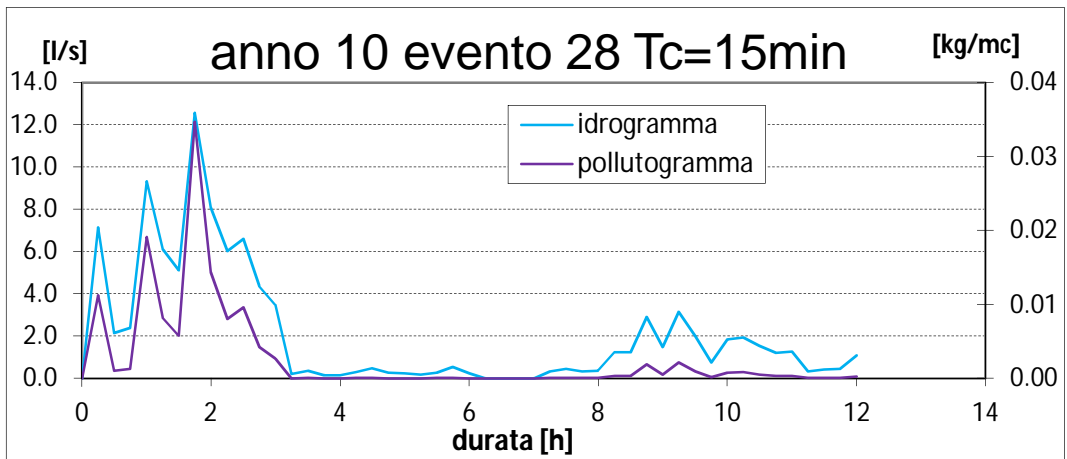
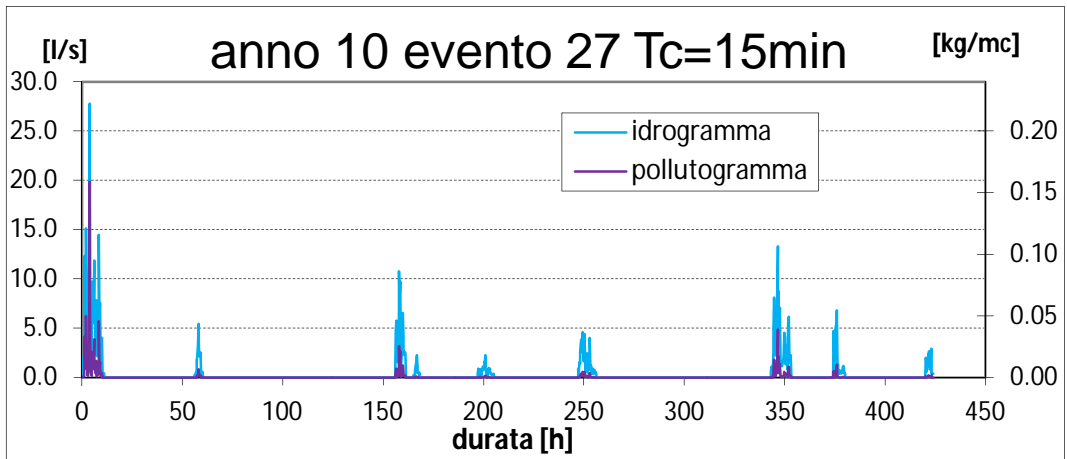
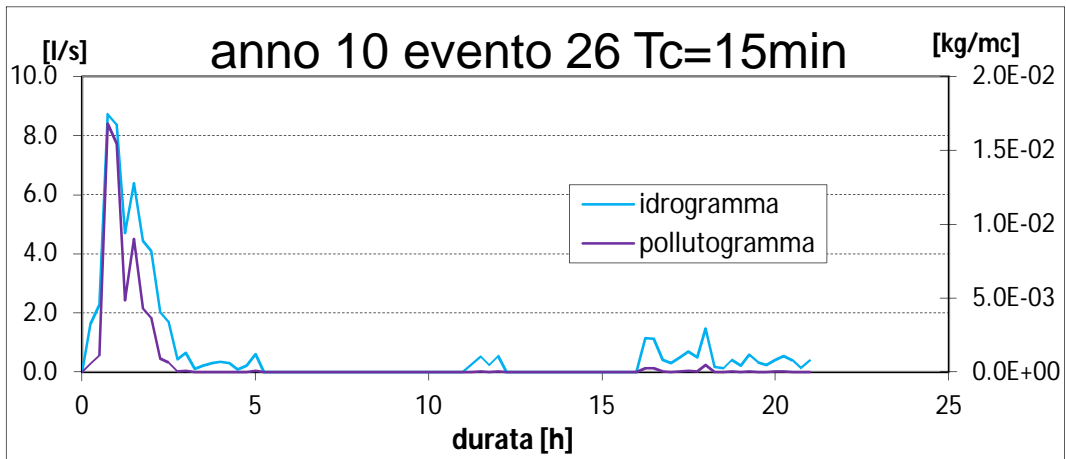
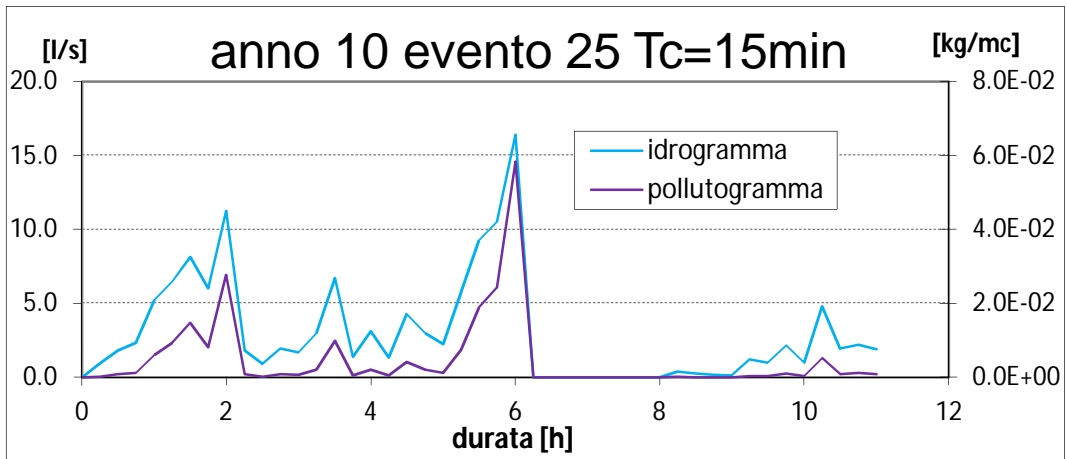


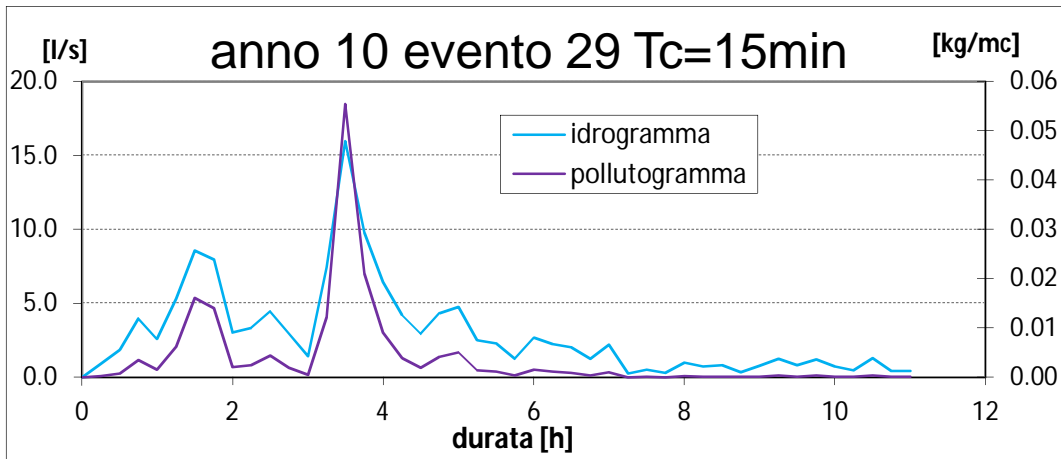




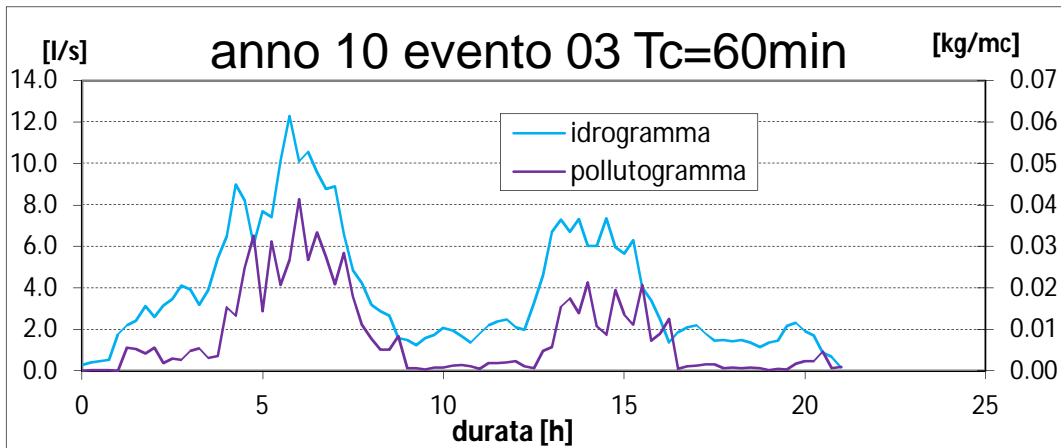
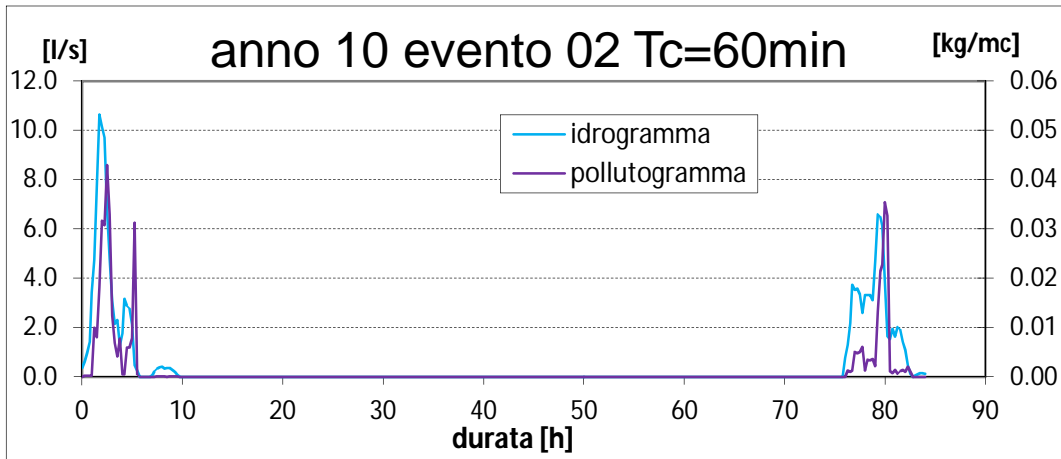
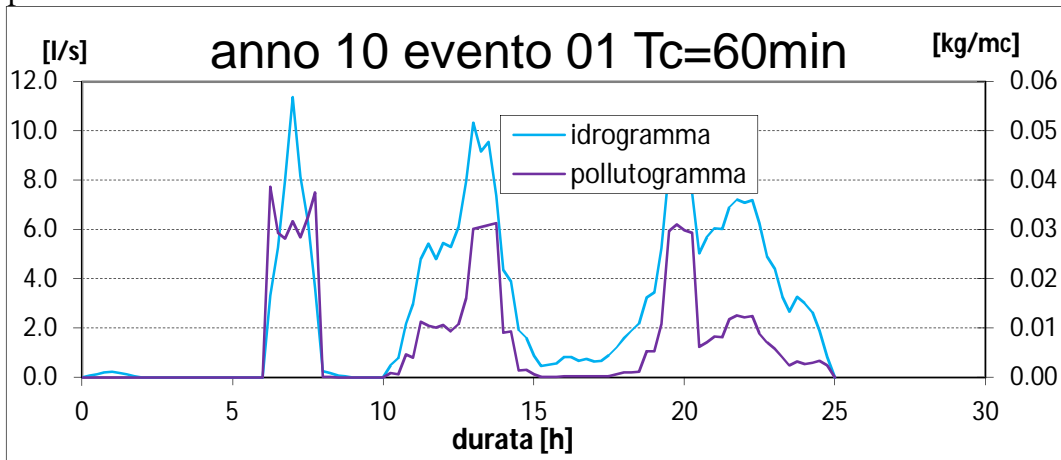


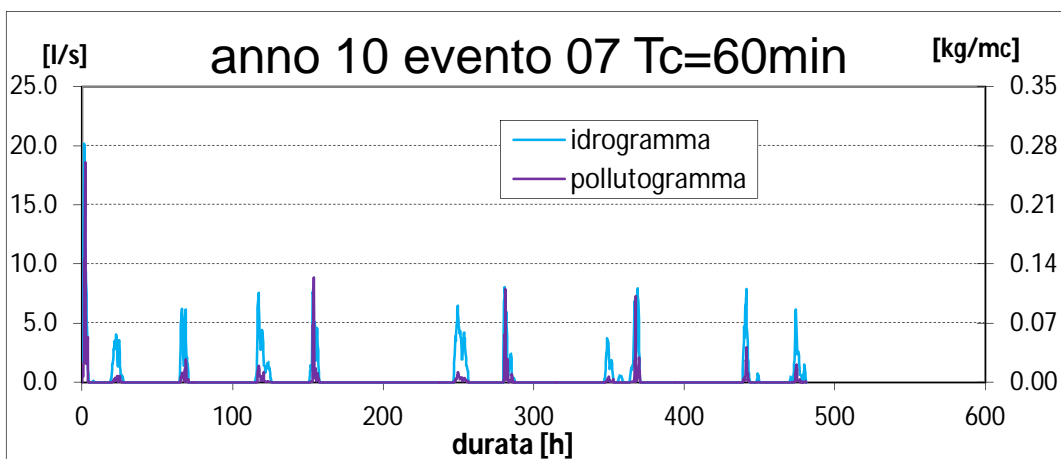
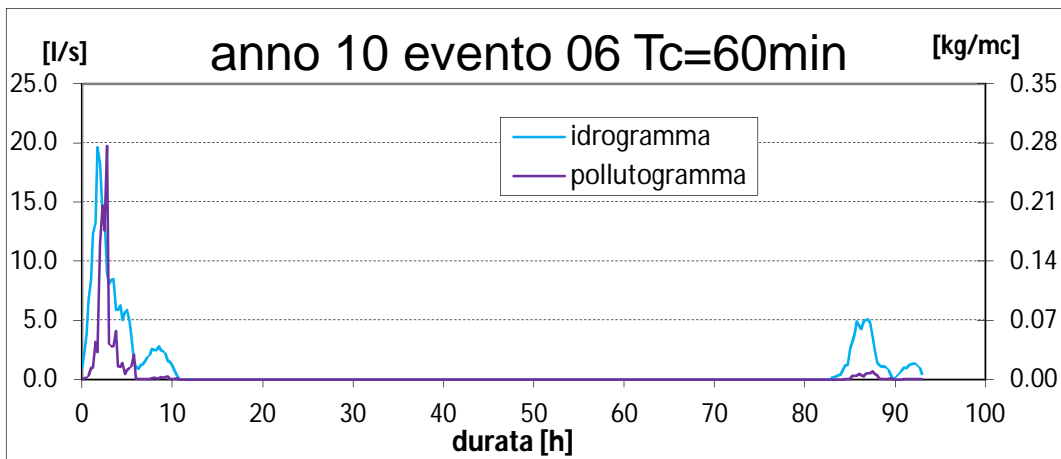
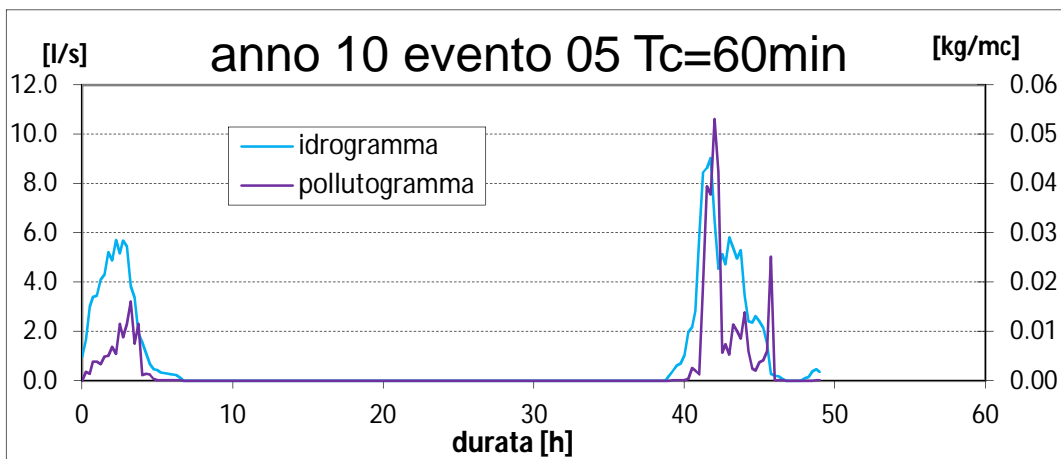
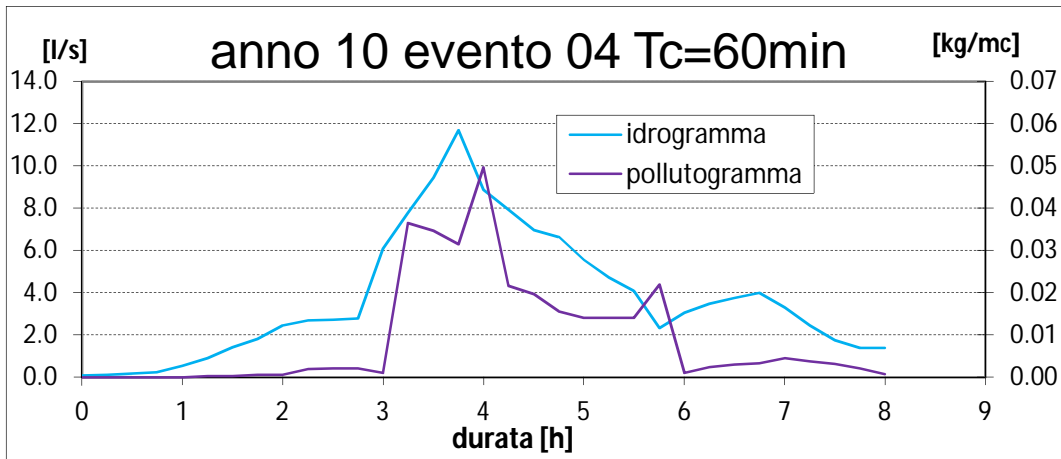


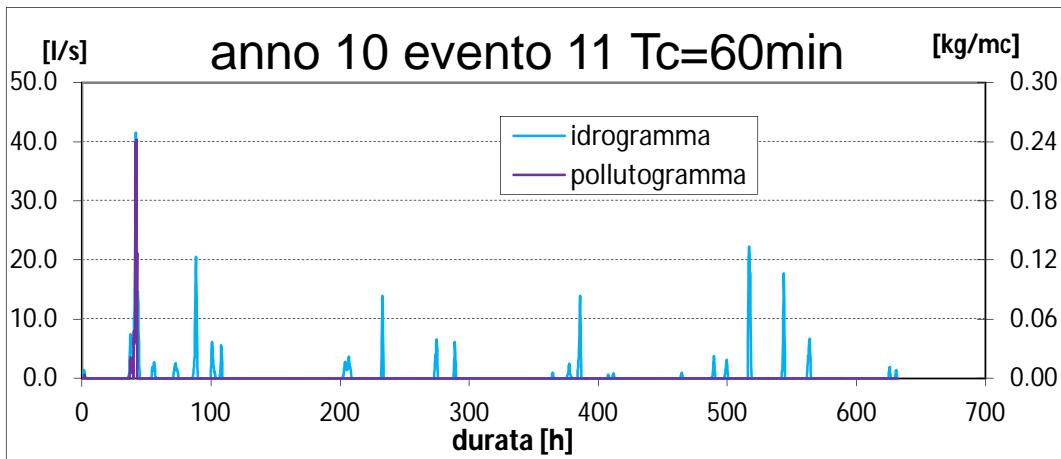
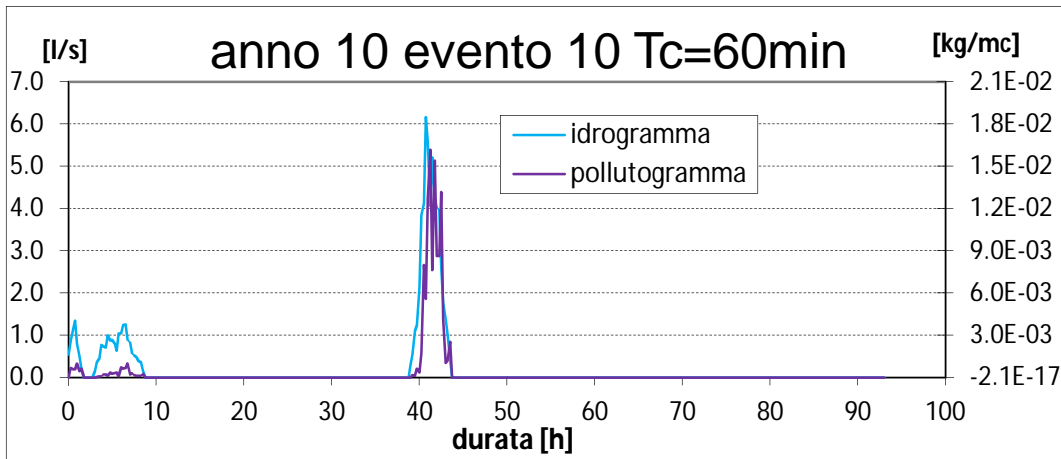
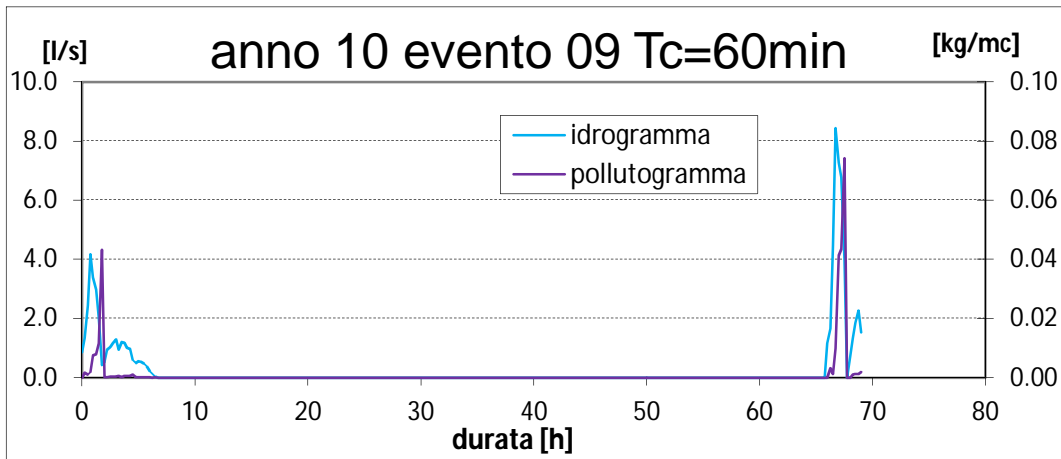
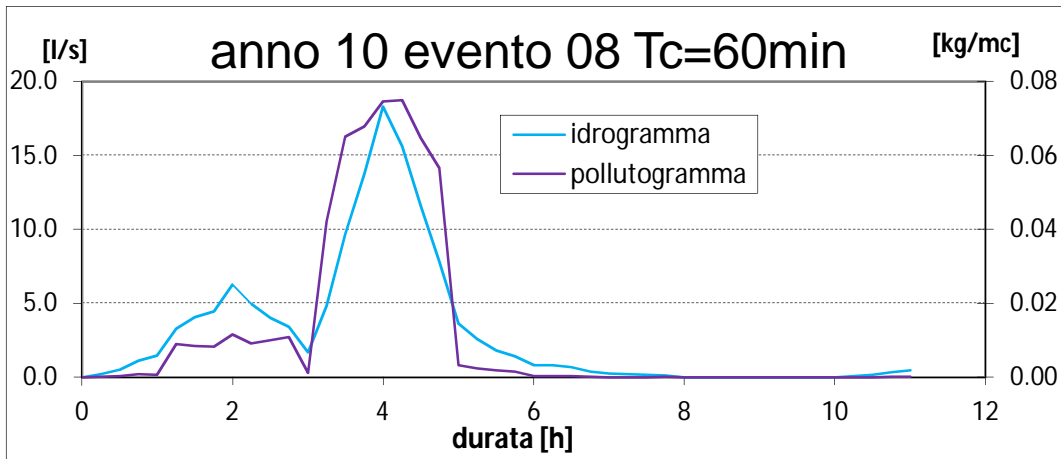


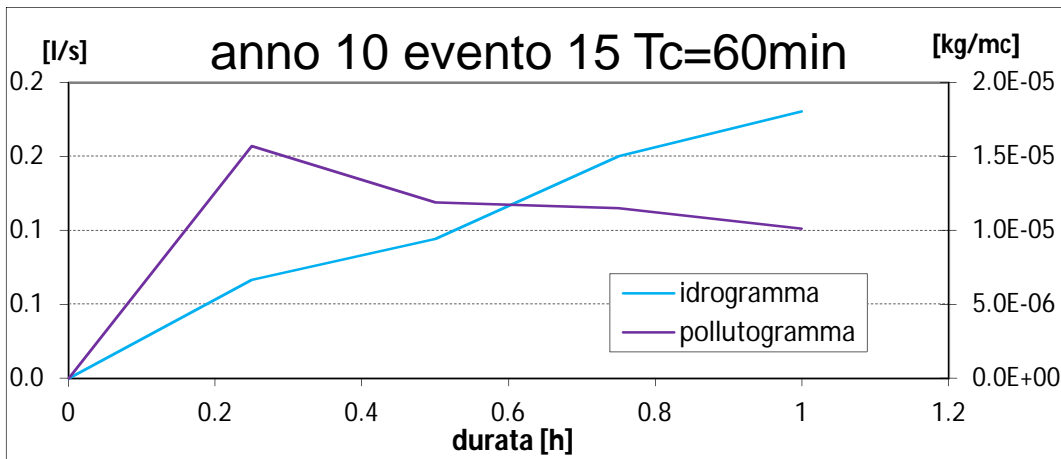
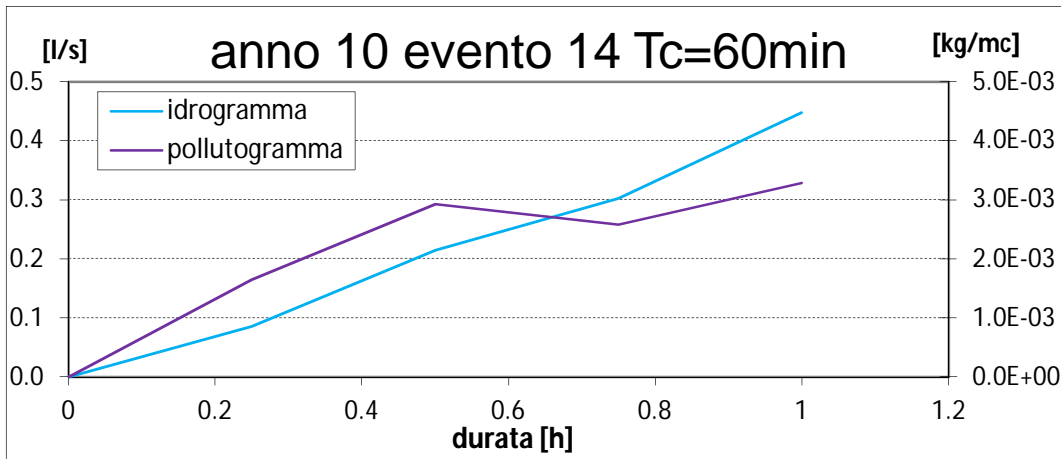
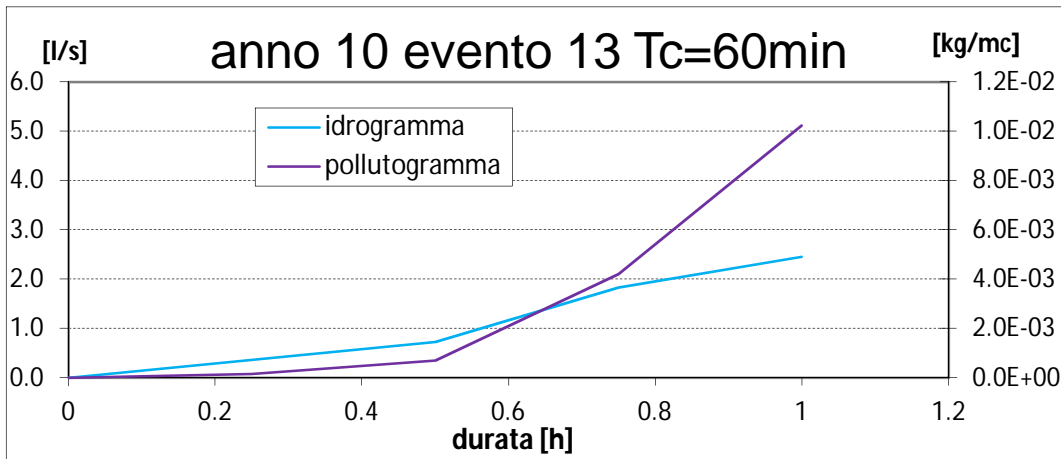
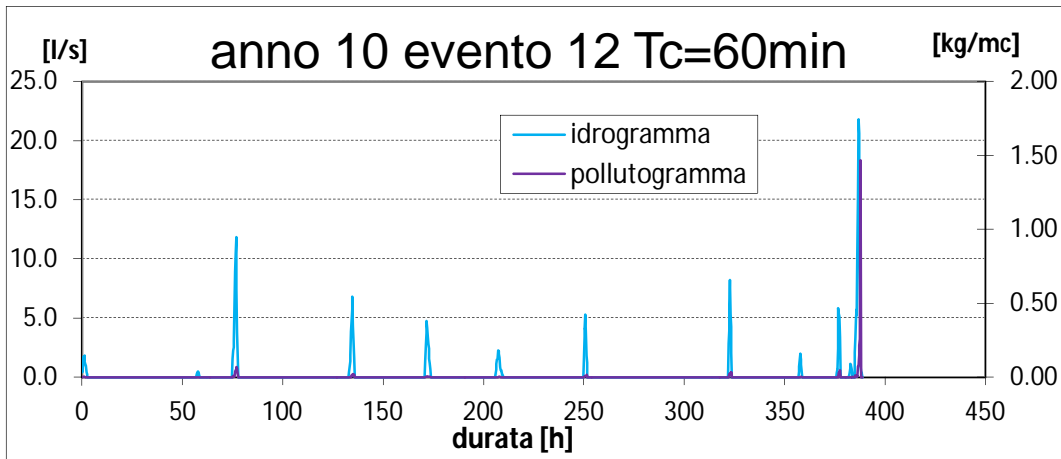


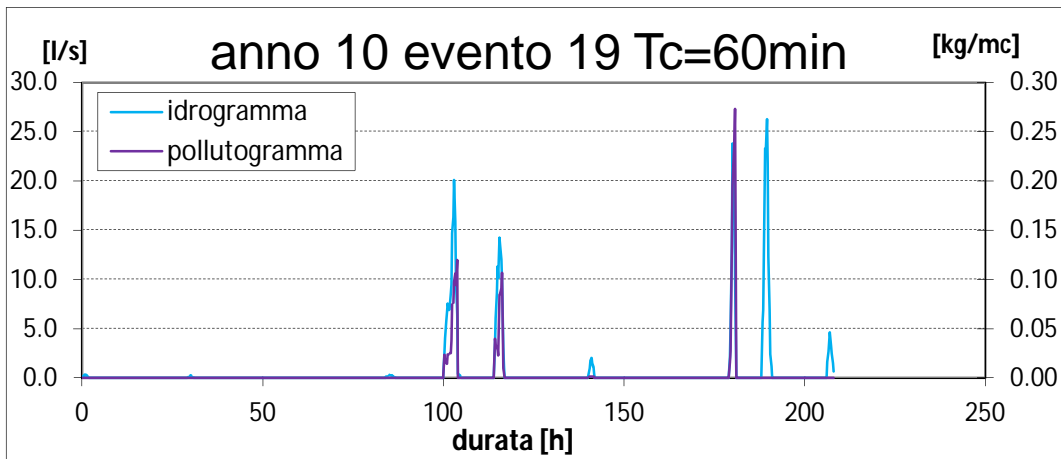
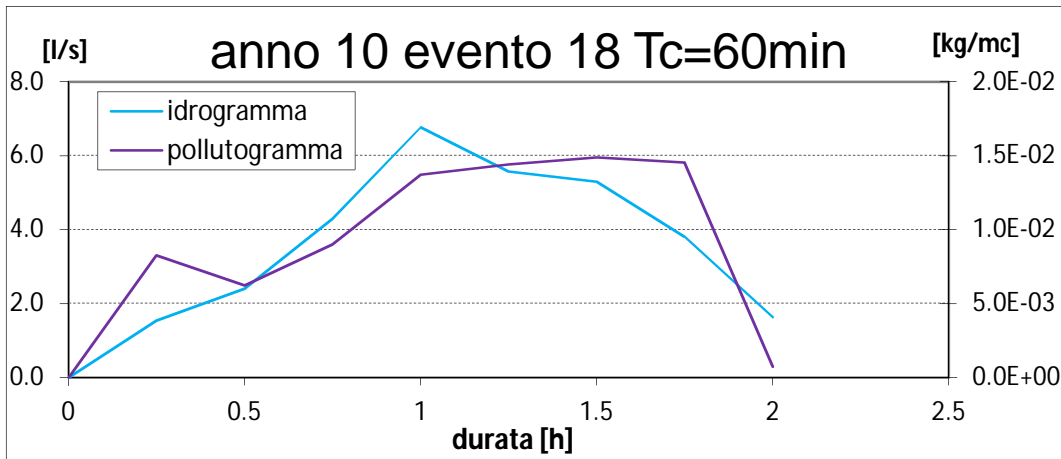
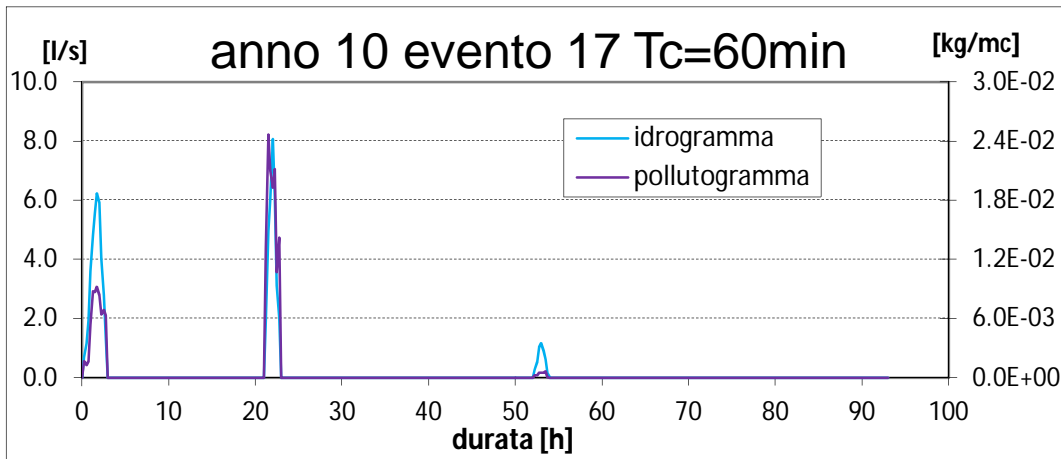
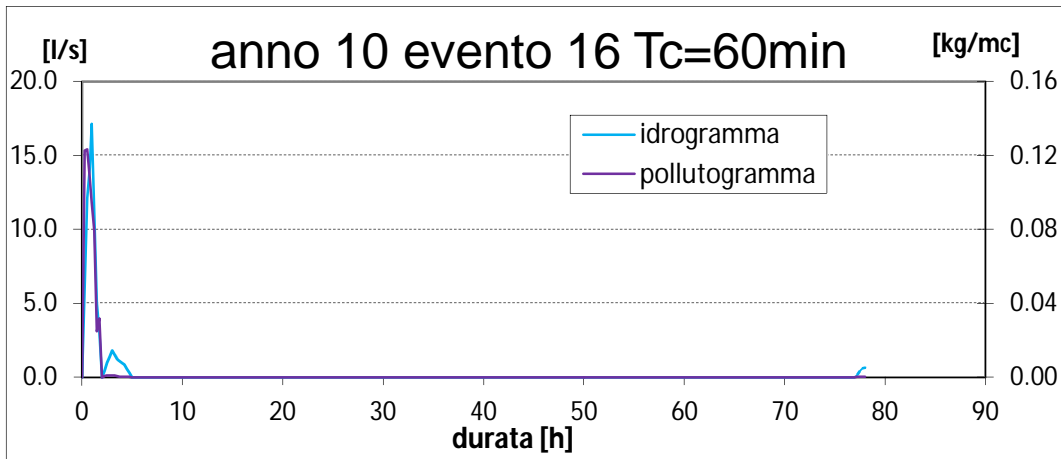
Tempo di corrivazione 60 minuti

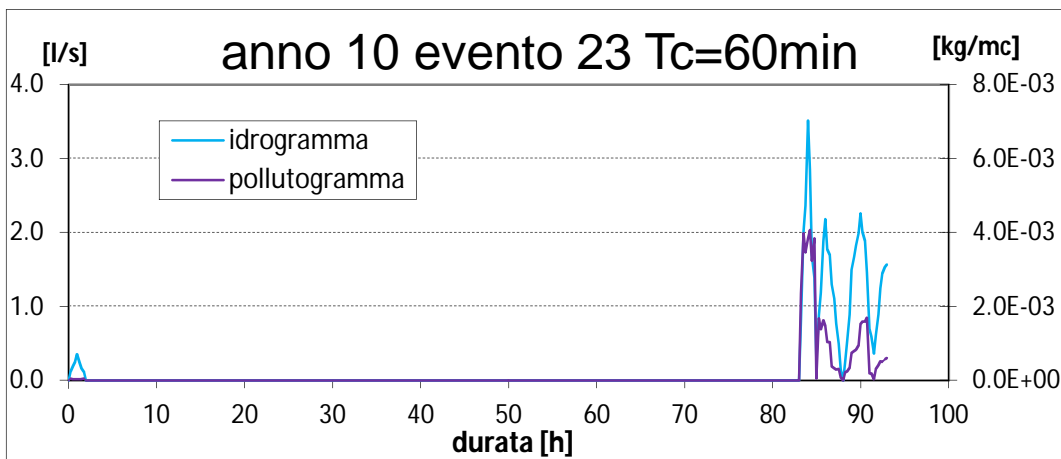
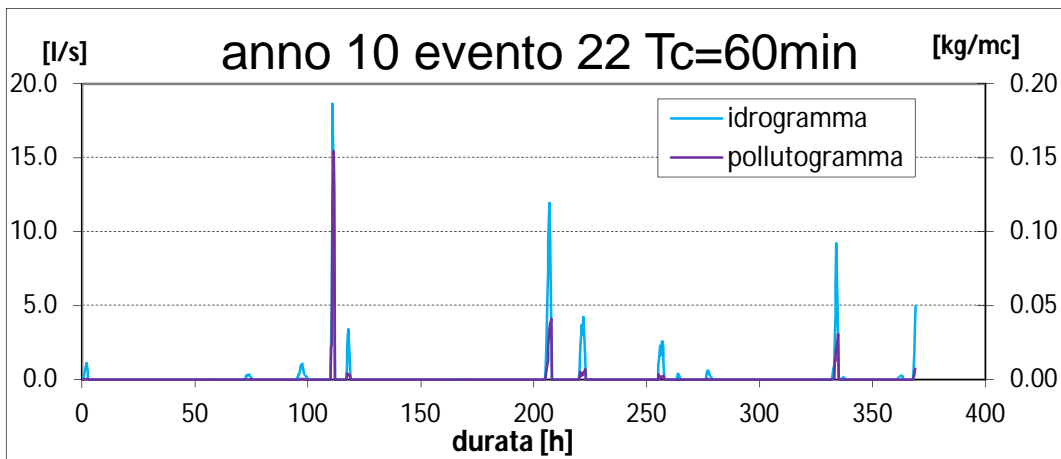
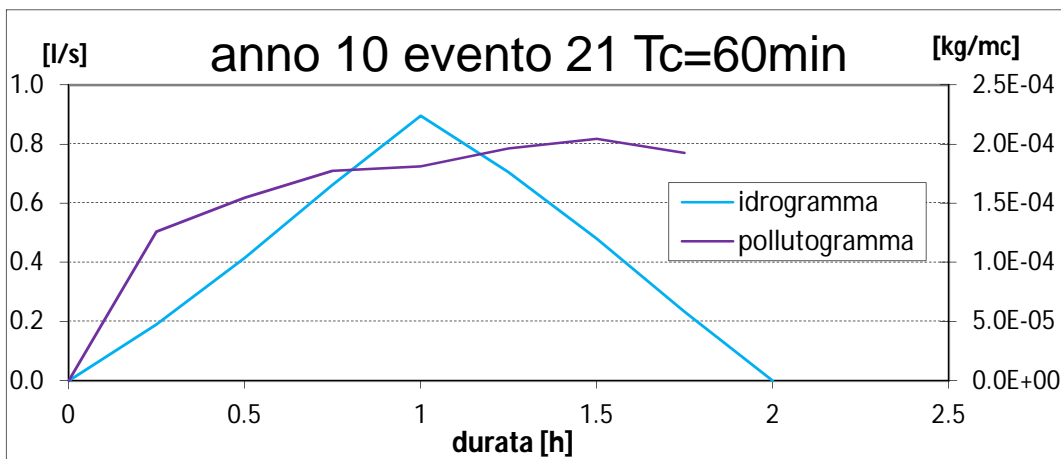
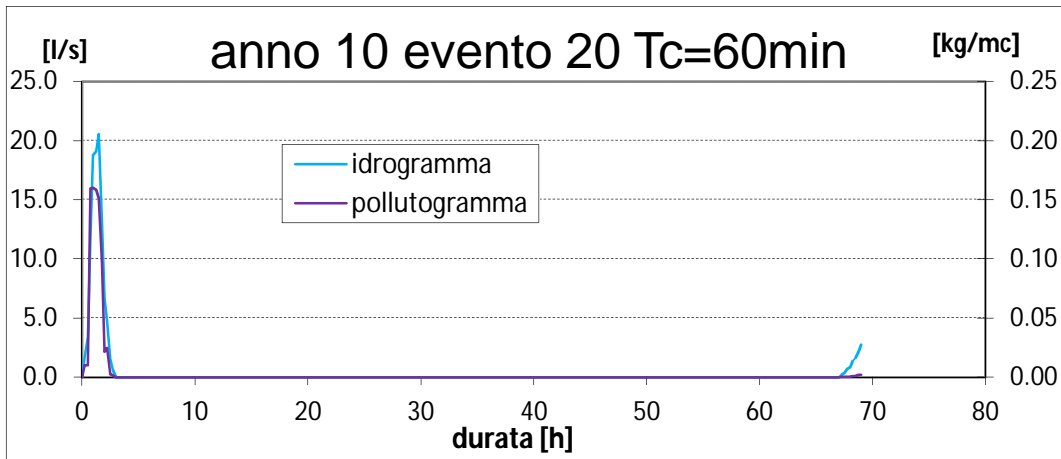


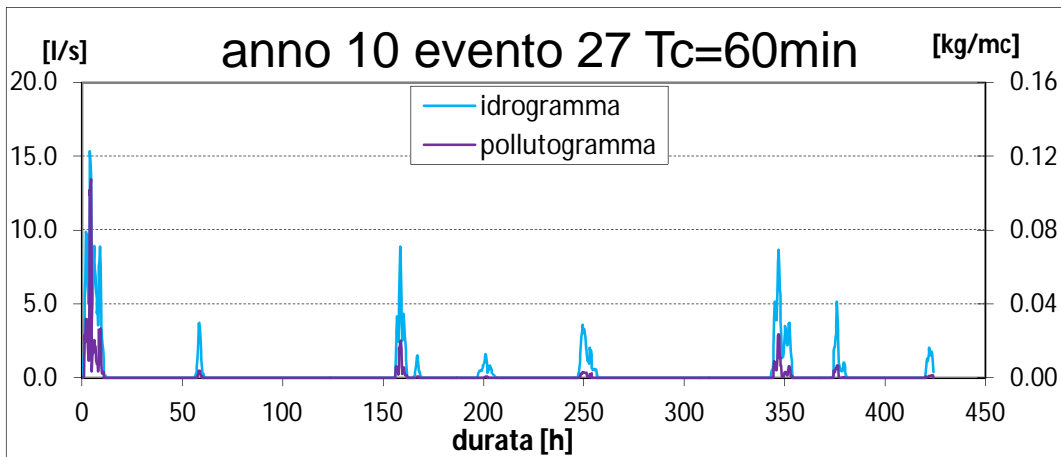
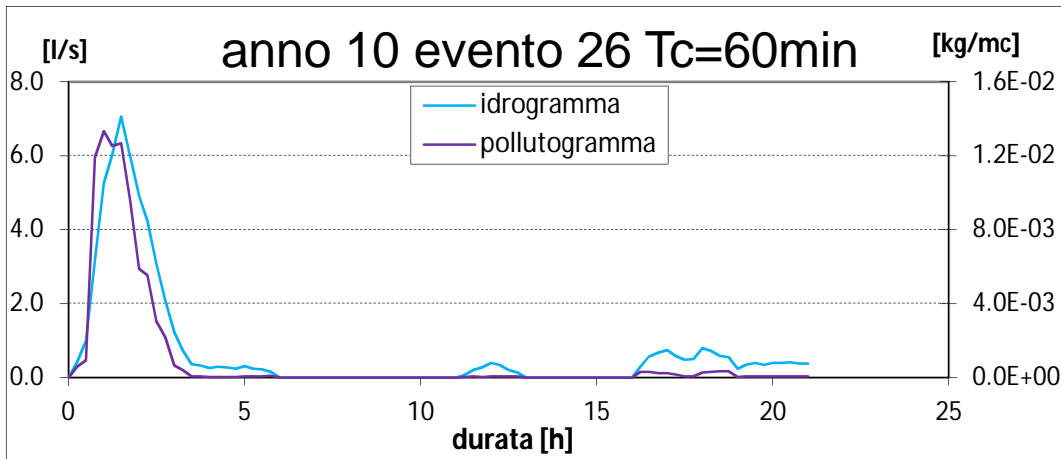
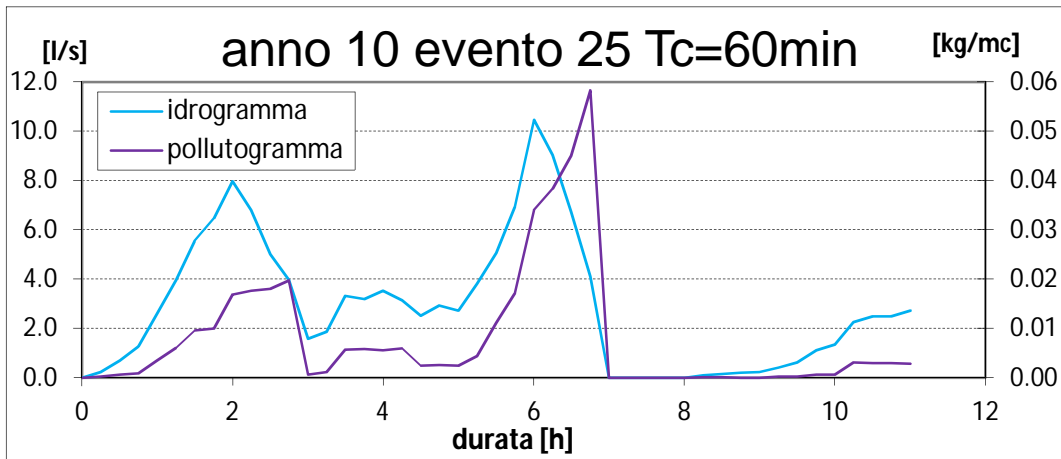
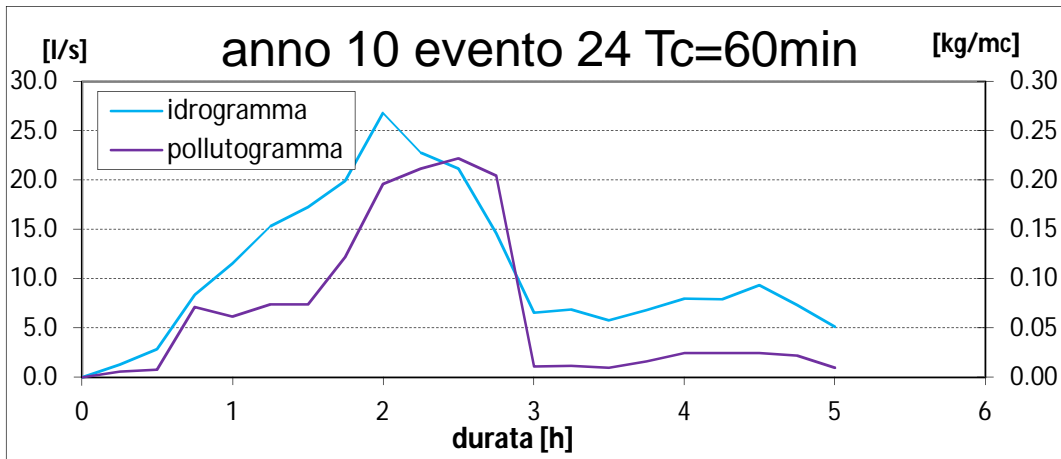




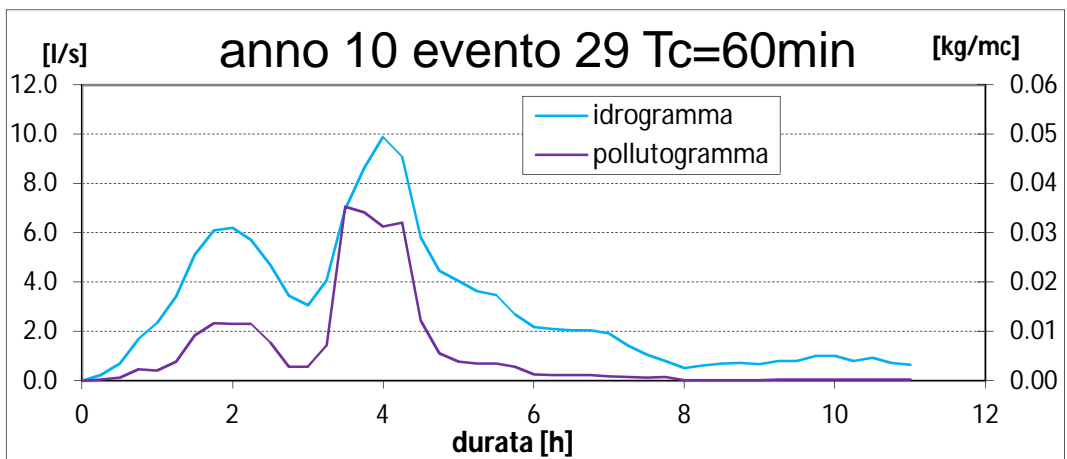
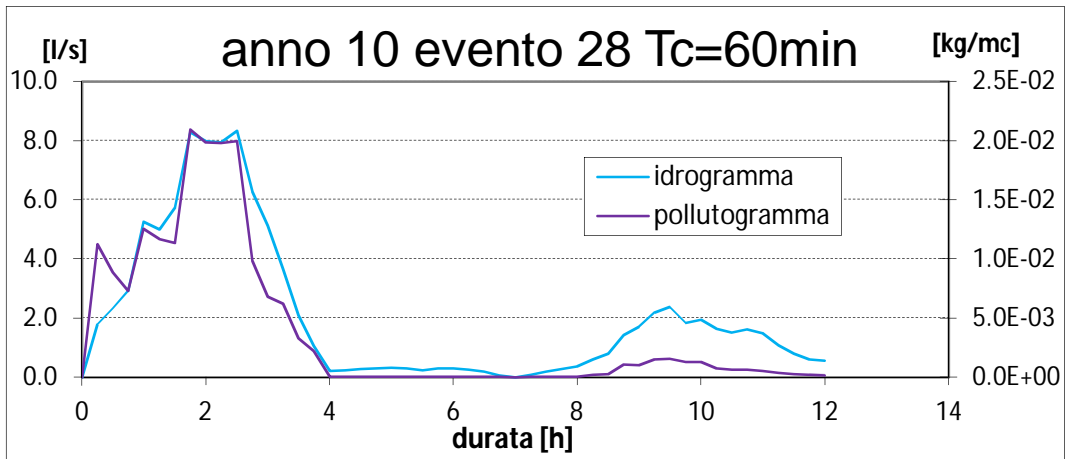










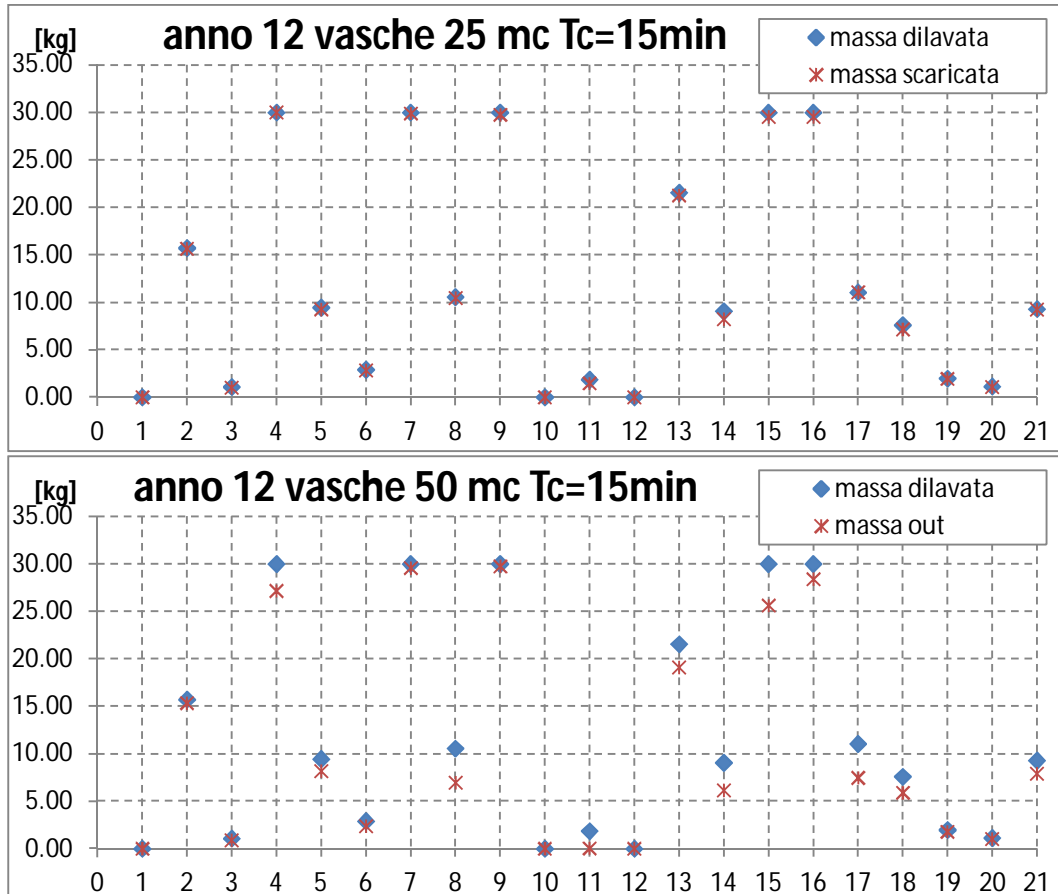


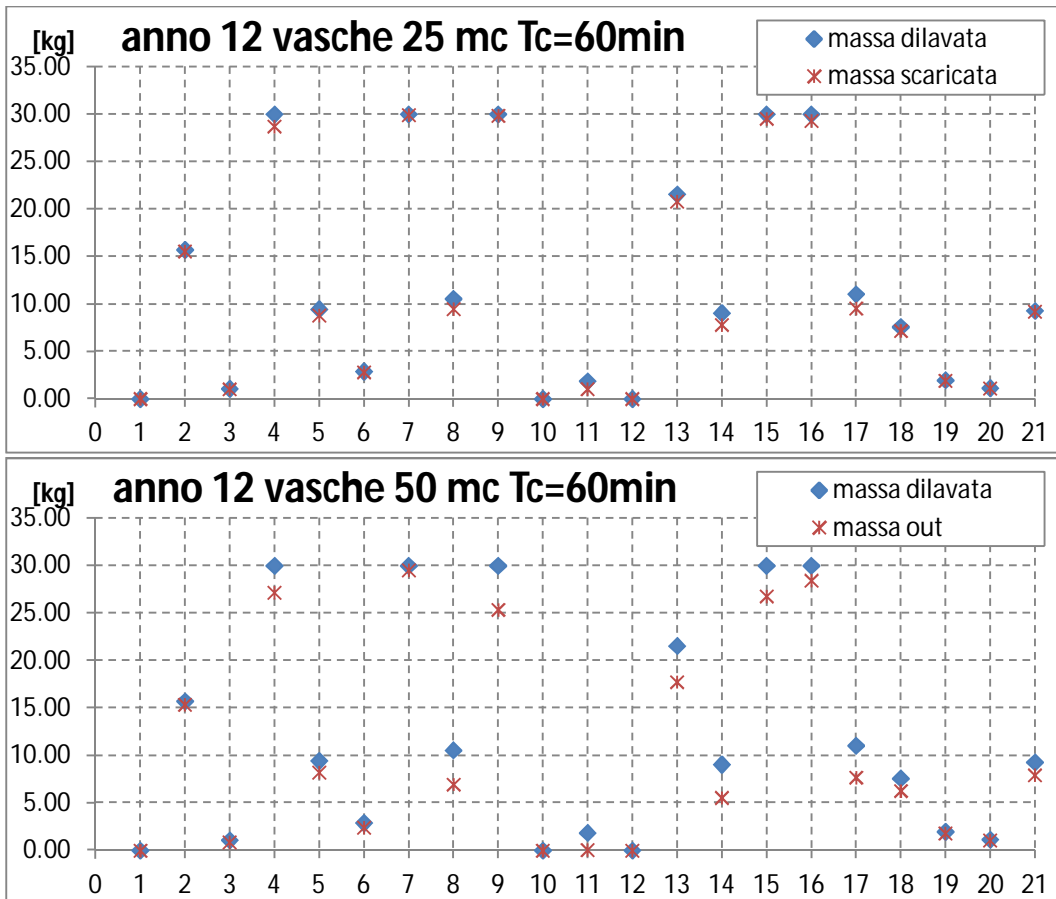
## Appendice C

### Simulazione delle masse scaricate relative agli eventi analizzati

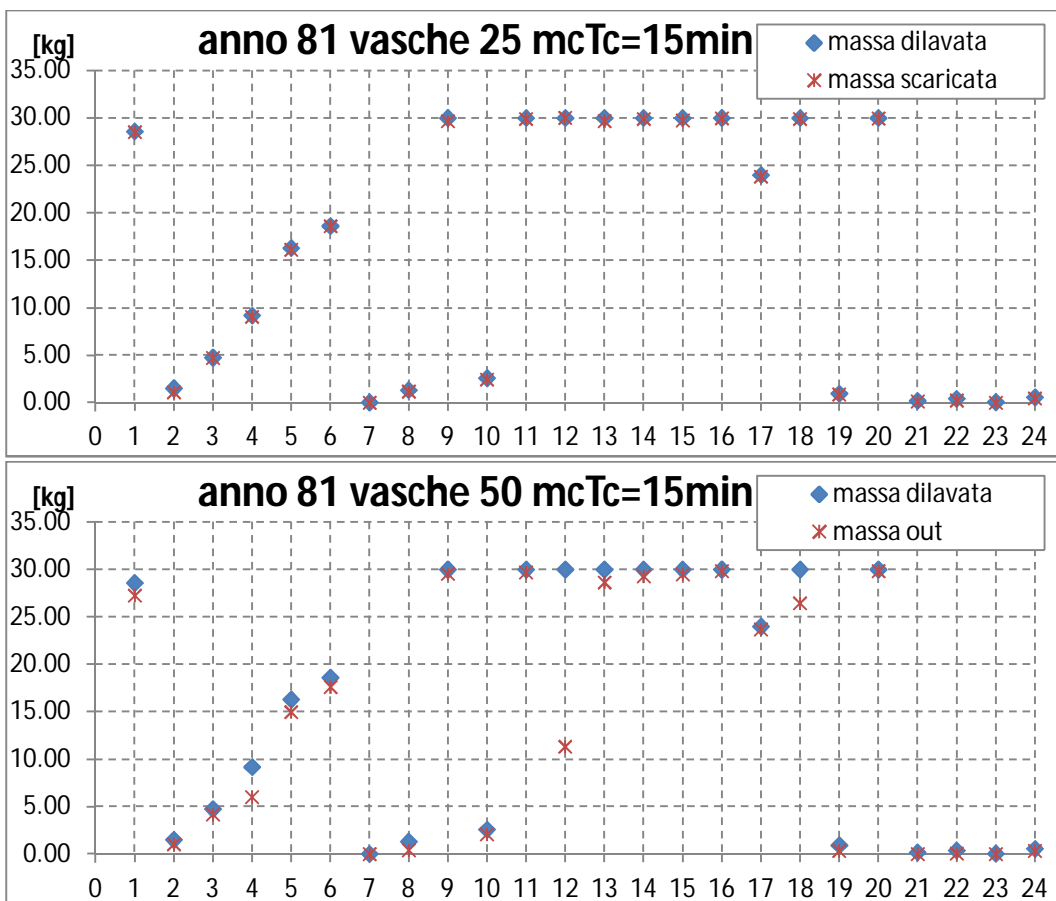
Nell'appendice si riportano tutti i grafici riassuntivi delle simulazioni ad evento, contenenti masse in ingresso e in uscita alla vasca, per tempi di corrivazione di 15 e 60 minuti. i modelli e i parametri utilizzati per il calcolo sono gli stessi esposti nella tesi. L'Appendice è divisa in tre parti, ognuna delle quali riporta i risultati di uno dei tre anni analizzati.

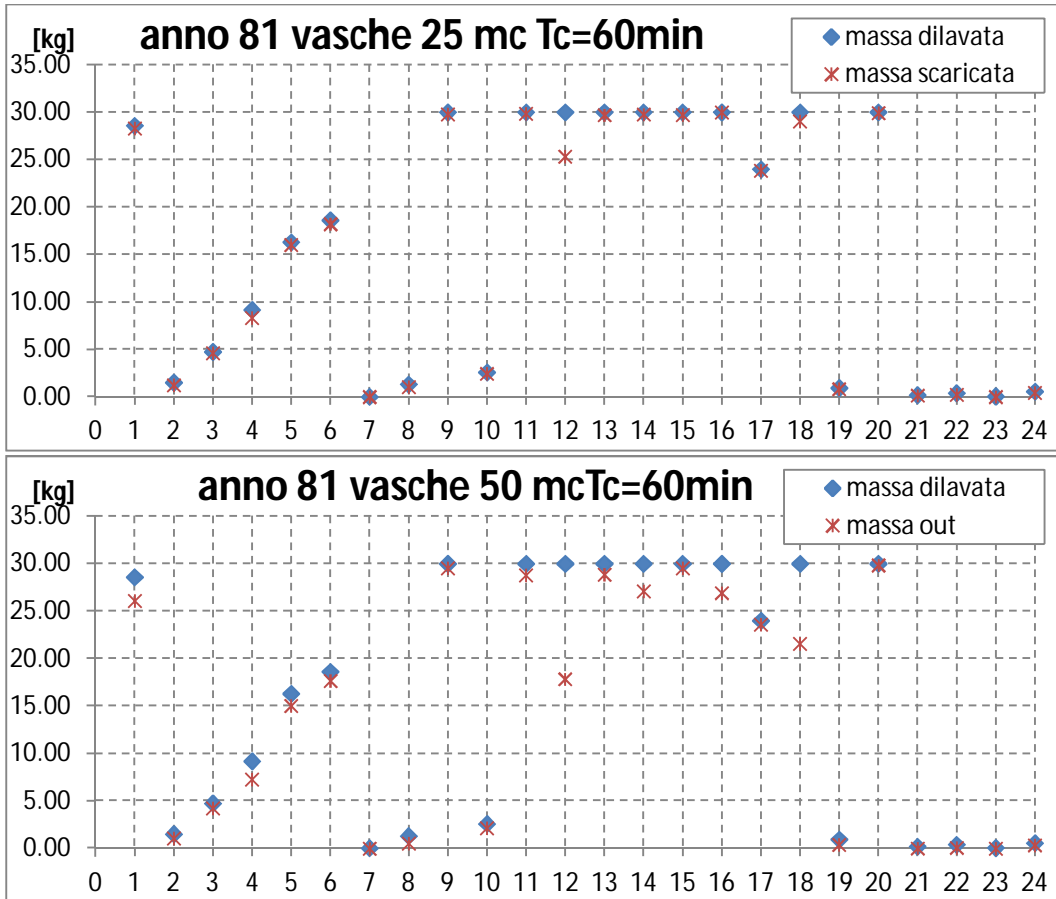
#### C.1 Anno medio: numero 12



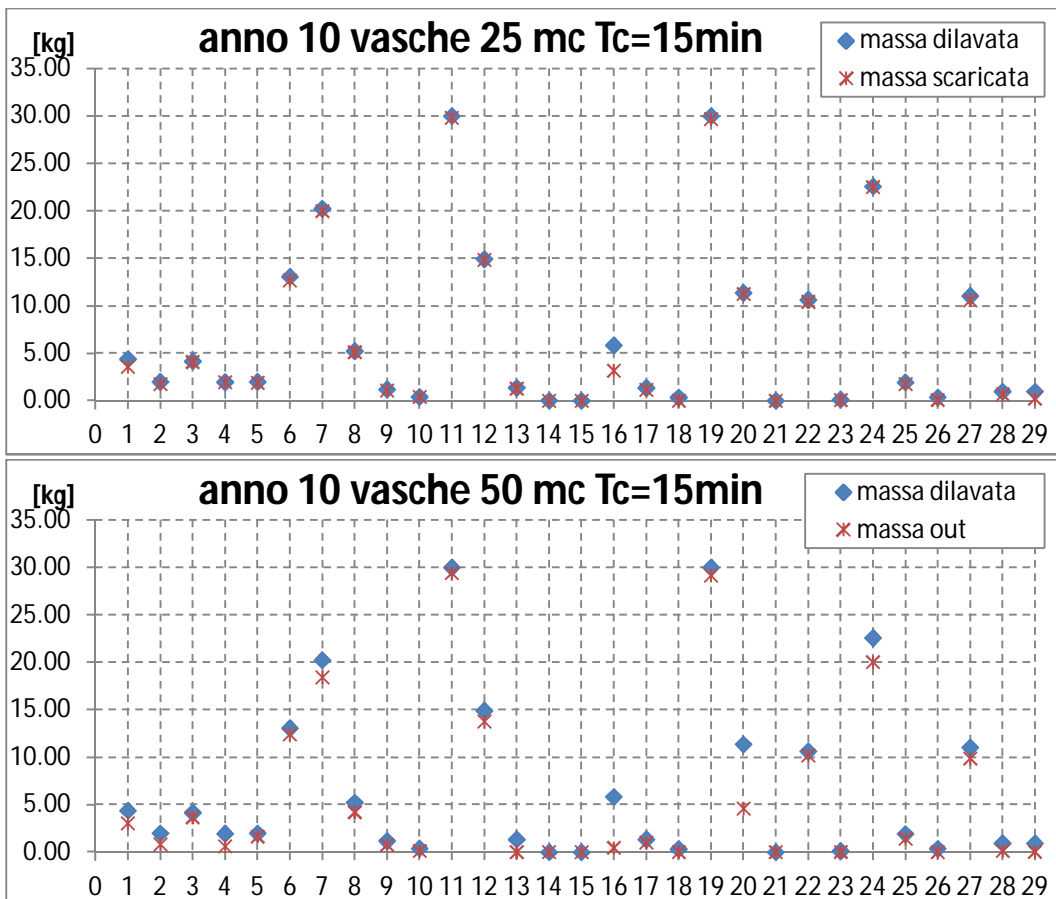


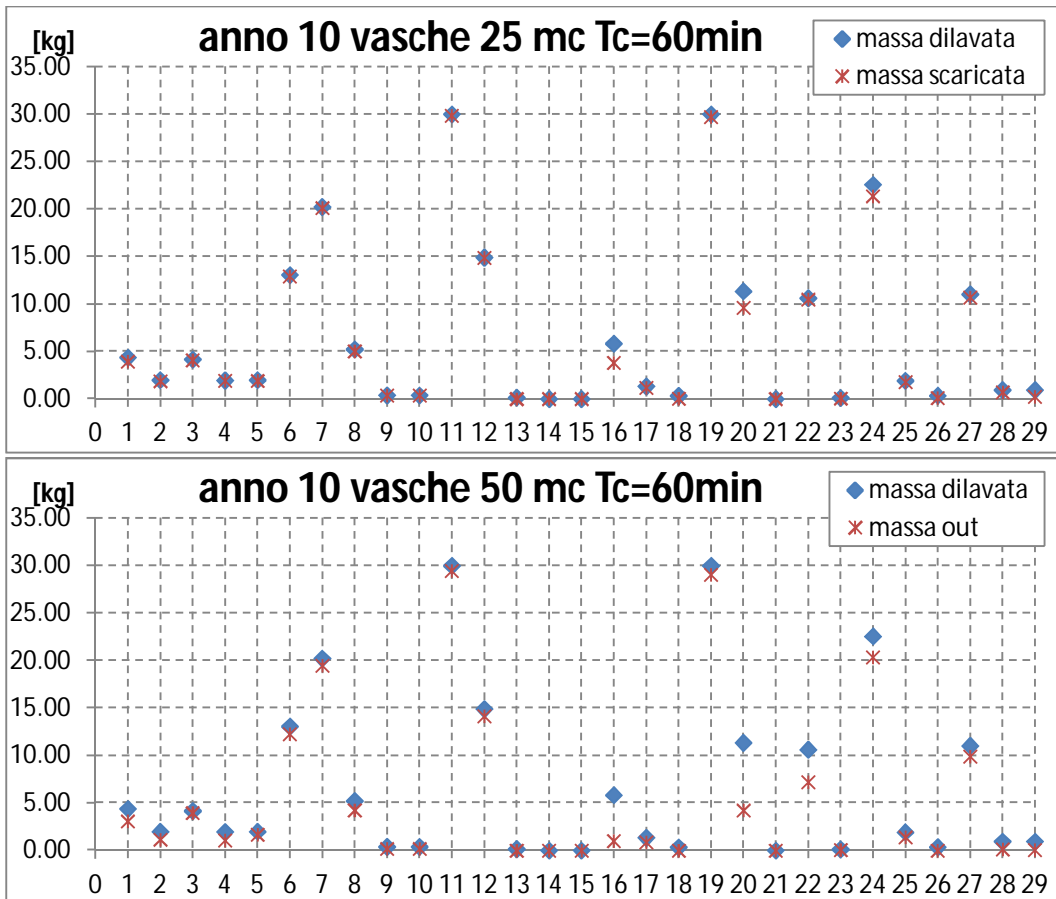
C.2 Anno massimo: numero 81





**C.3 Anno minimo: numero 10**



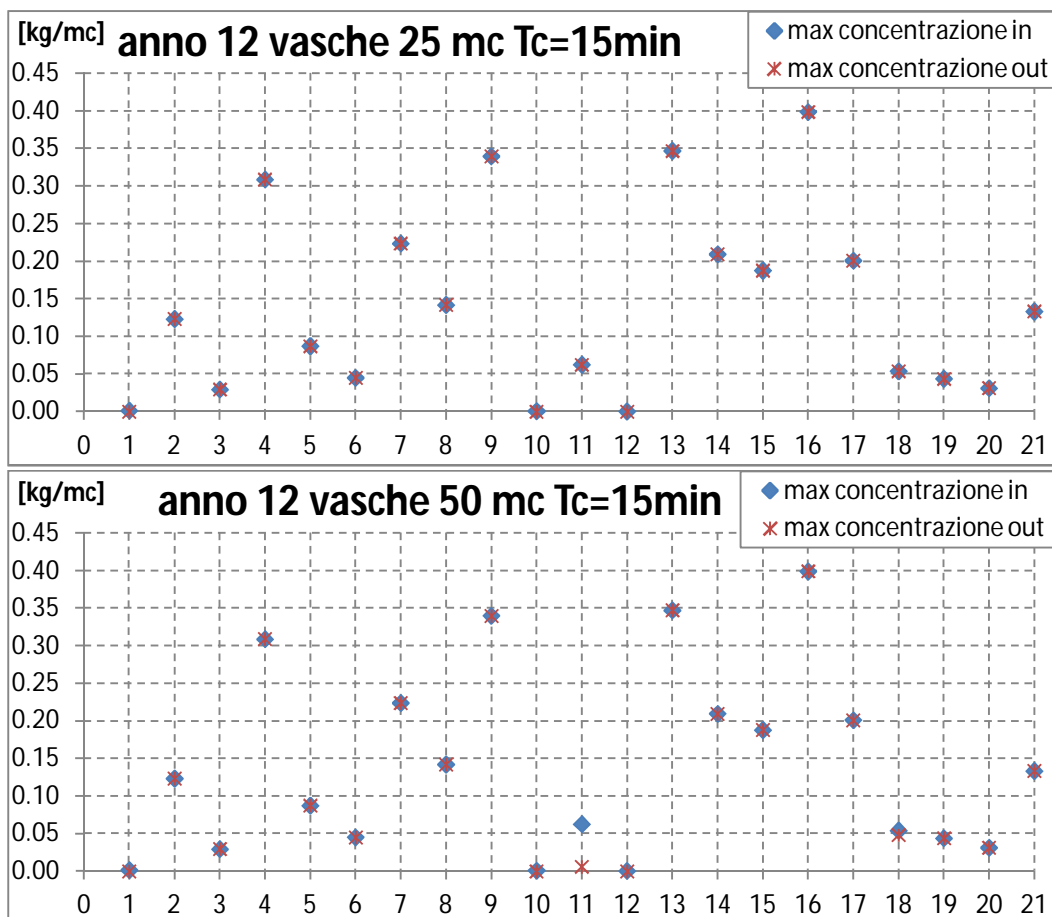


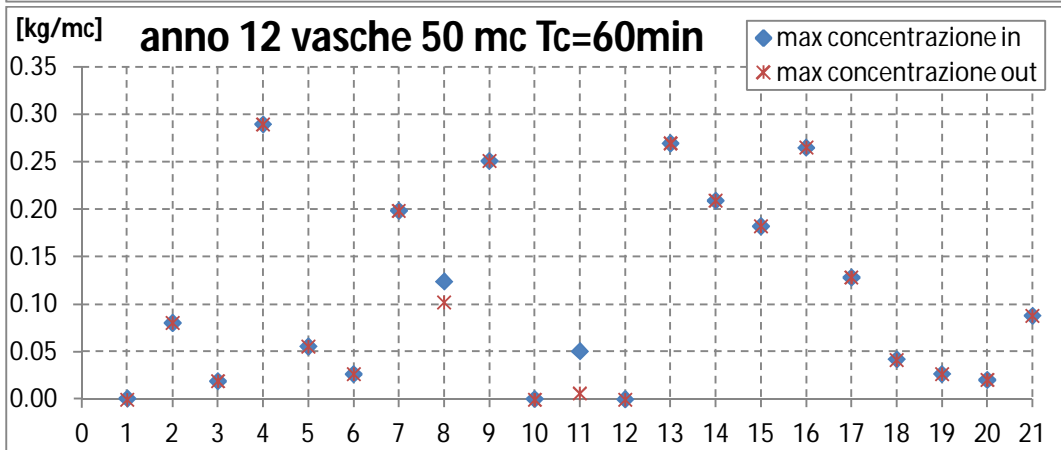
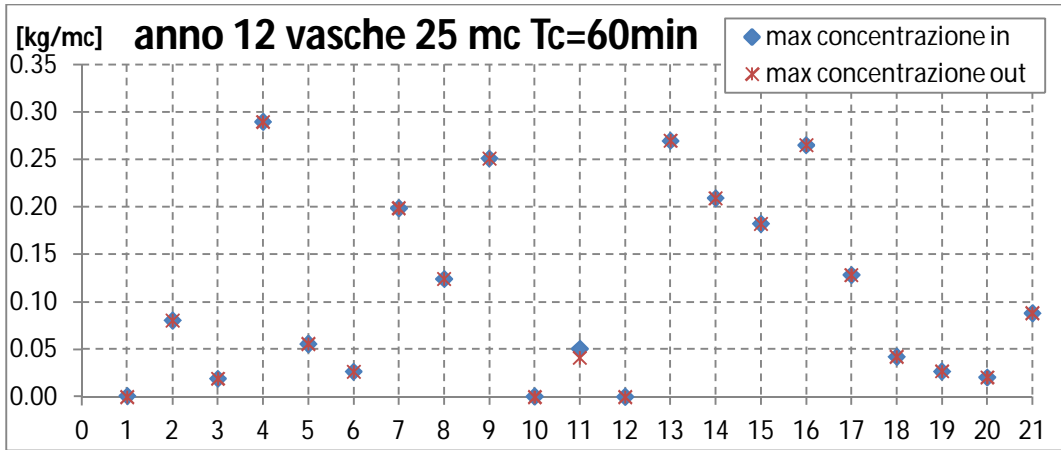
## Appendice D

### Simulazione delle concentrazioni scaricate relative agli eventi analizzati

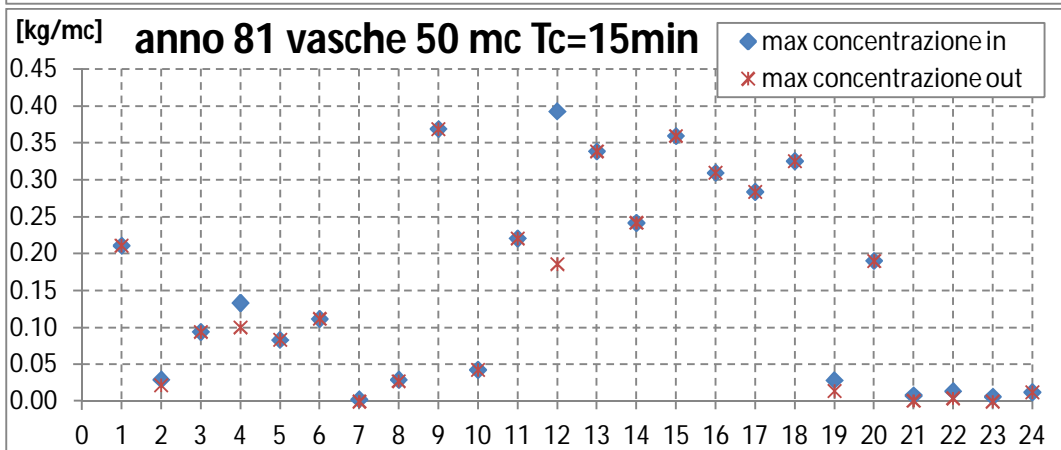
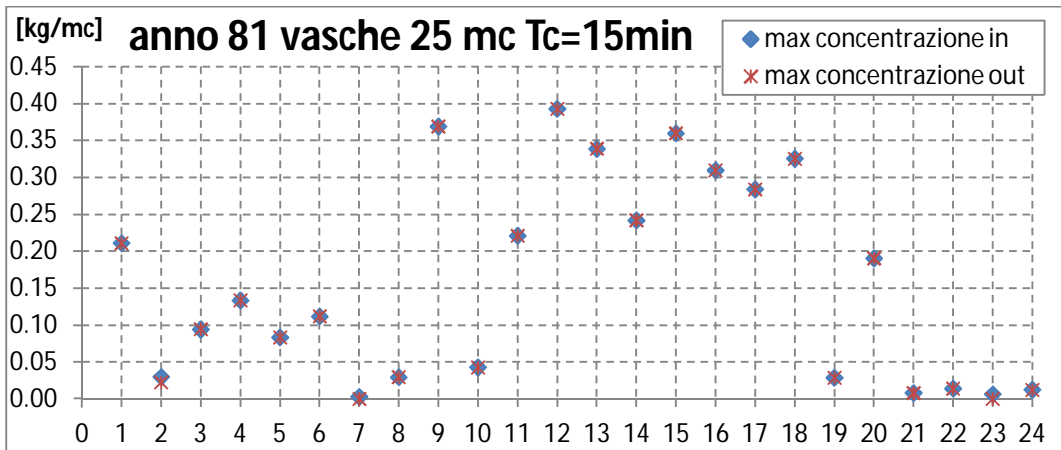
Nell'appendice si riportano tutti i grafici riassuntivi delle simulazioni ad evento, contenenti concentrazioni di picco in ingresso e in uscita alla vasca, per tempi di corrvazione di 15 e 60 minuti. i modelli e i parametri utilizzati per il calcolo sono gli stessi esposti nella tesi. L'Appendice è divisa in tre parti, ognuna delle quali riporta i risultati di uno dei tre anni analizzati.

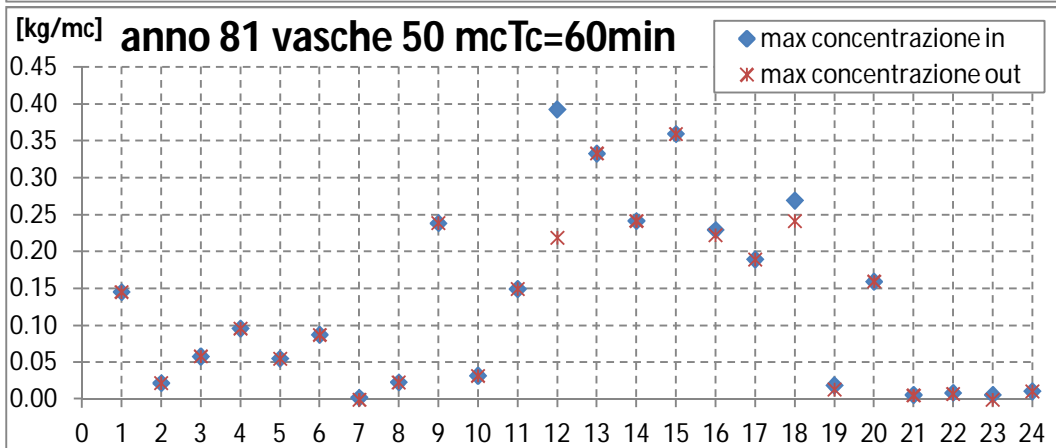
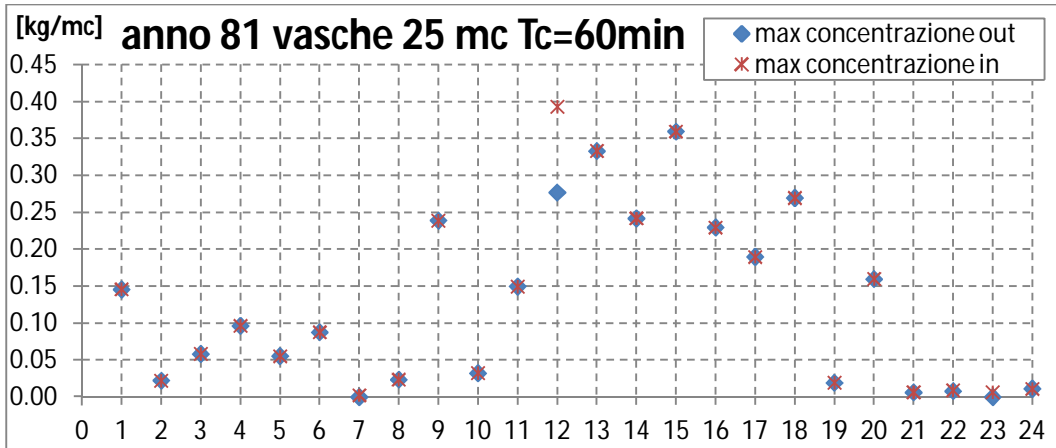
#### D.1 Anno medio: numero 12



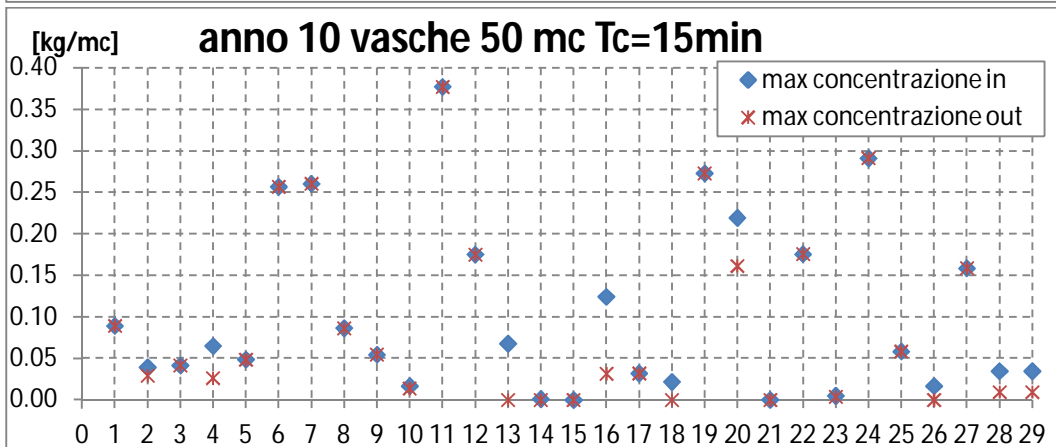
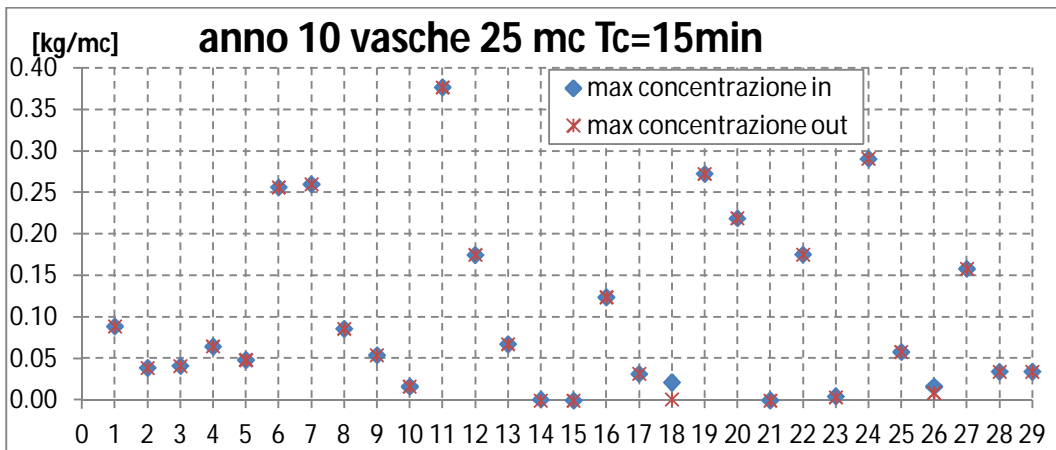


**D.2 Anno massimo: numero 81**

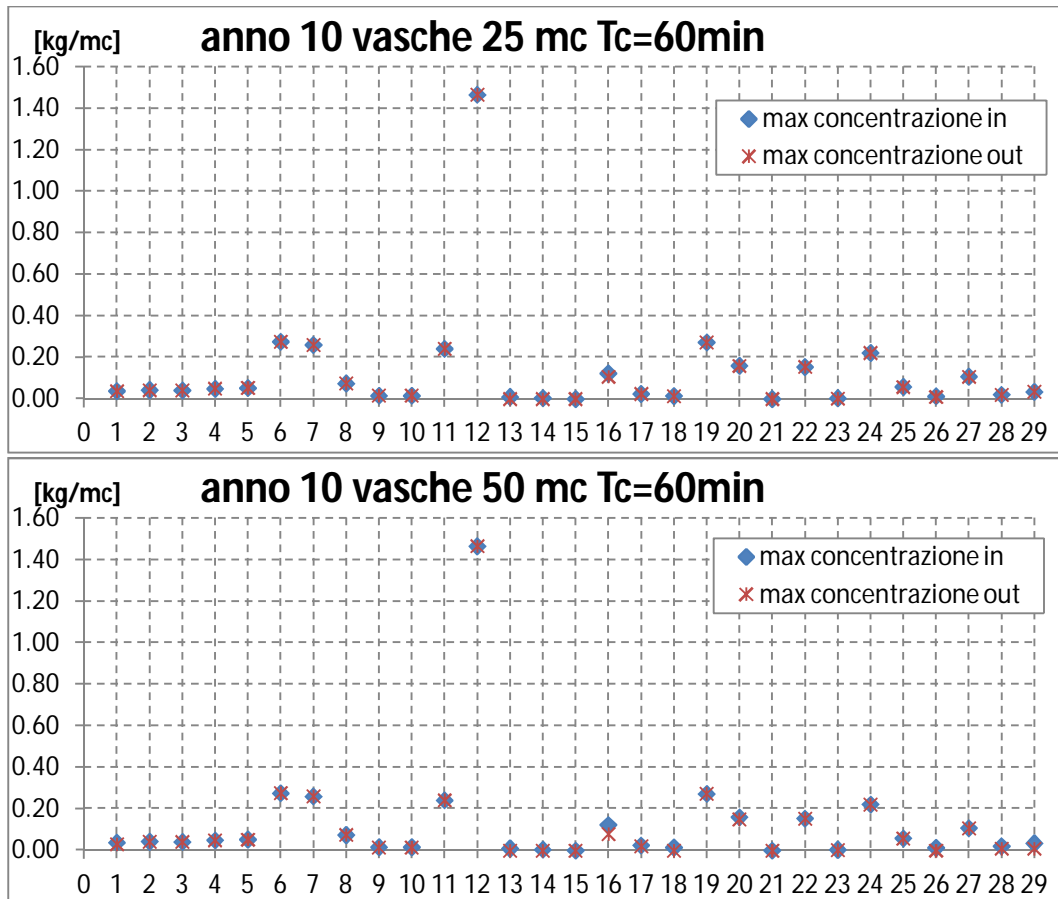




**D.3 Anno minimo: numero 10**







## Appendice E

### Efficienze stimate per gli eventi analizzati

Nell'appendice si riportano tutti i grafici con le efficienze, riguardanti masse e le concentrazioni di picco scaricate, calcolate sulla base delle simulazioni ad evento per tempi di corrivazione di 15 e 60 minuti. L'Appendice è divisa in tre parti, ognuna delle quali riporta i risultati di uno dei tre anni analizzati.

#### E.1 Anno medio: numero 12

evento	rendimenti rimozione Tc=15min				rendimenti rimozione Tc=60min			
	masse		concentrazioni		masse		concentrazioni	
	25 mc	50 mc	25 mc	50 mc	25 mc	50 mc	25 mc	50 mc
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
3	0.06	0.19	0.00	0.00	0.06	0.19	0.00	0.00
4	0.00	0.09	0.00	0.00	0.04	0.09	0.00	0.00
5	0.02	0.13	0.00	0.00	0.07	0.13	0.00	0.00
6	0.02	0.17	0.00	0.00	0.03	0.17	0.00	0.00
7	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
8	0.01	0.34	0.00	0.00	0.10	0.34	0.00	0.18
9	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.15	0.00	0.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11	0.22	0.97	0.00	0.90	0.44	0.96	0.19	0.88
12	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
13	0.01	0.11	0.00	0.00	0.03	0.18	0.00	0.00
14	0.09	0.32	0.00	0.00	0.14	0.39	0.00	0.00
15	0.02	0.15	0.00	0.00	0.02	0.11	0.00	0.00
16	0.02	0.05	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00
17	0.00	0.32	0.00	0.00	0.14	0.30	0.00	0.00
18	0.06	0.22	0.00	0.11	0.06	0.17	0.00	0.02
19	0.02	0.09	0.00	0.00	0.02	0.09	0.00	0.00
20	0.03	0.08	0.00	0.00	0.03	0.08	0.00	0.00
21	0.00	0.15	0.00	0.00	0.01	0.15	0.00	0.00

**E.2 Anno massimo: numero 81**

evento	rendimenti rimozione Tc=15min				rendimenti rimozione Tc=60min			
	masse		concentrazioni		masse		concentrazioni	
	25 mc	50 mc	25 mc	50 mc	25 mc	50 mc	25 mc	50 mc
1	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00
2	0.28	0.31	0.25	0.25	0.20	0.31	0.00	0.00
3	0.00	0.12	0.00	0.00	0.03	0.11	0.00	0.00
4	0.01	0.34	0.00	0.25	0.09	0.21	0.00	0.00
5	0.01	0.08	0.00	0.00	0.02	0.08	0.00	0.00
6	0.00	0.05	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00
7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8	0.11	0.67	0.00	0.06	0.21	0.61	0.00	0.02
9	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
10	0.05	0.19	0.00	0.00	0.06	0.18	0.00	0.00
11	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00
12	0.00	0.62	0.00	0.53	0.16	0.41	0.30	0.44
13	0.01	0.05	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00
14	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.10	0.00	0.00
15	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
16	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.03
17	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
18	0.00	0.12	0.00	0.00	0.03	0.28	0.00	0.10
19	0.08	0.61	0.00	0.50	0.14	0.57	0.00	0.29
20	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
21	0.30	0.97	0.00	0.89	0.30	0.93	0.00	0.14
22	0.43	0.88	0.00	0.69	0.40	0.81	0.11	0.14
23	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
24	0.24	0.41	0.00	0.00	0.26	0.40	0.00	0.00

**E.3 Anno minimo: numero 10**

evento	rendimenti rimozione Tc=15min				rendimenti rimozione Tc=60min			
	masse		concentrazioni		masse		concentrazioni	
	25 mc	50 mc	25 mc	50 mc	25 mc	50 mc	25 mc	50 mc
1	0.18	0.30	0.00	0.00	0.10	0.30	0.03	0.19
2	0.11	0.58	0.00	0.25	0.05	0.42	0.00	0.00
3	0.02	0.12	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00
4	0.01	0.69	0.00	0.59	0.01	0.46	0.00	0.00
5	0.05	0.16	0.00	0.00	0.04	0.15	0.00	0.00
6	0.03	0.05	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00
7	0.01	0.09	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00
8	0.03	0.19	0.00	0.00	0.04	0.19	0.00	0.00
9	0.08	0.34	0.00	0.00	0.02	0.59	0.00	0.05
10	0.03	0.68	0.00	0.17	0.02	0.59	0.00	0.05
11	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
12	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
13	0.06	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
14	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
16	0.46	0.92	0.00	0.74	0.34	0.83	0.13	0.36
17	0.13	0.25	0.00	0.00	0.12	0.37	0.00	0.14
18	0.99	1.00	0.94	1.00	0.85	1.00	0.02	1.00
19	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00
20	0.01	0.59	0.00	0.26	0.15	0.63	0.00	0.05
21	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
22	0.02	0.04	0.00	0.00	0.01	0.32	0.00	0.00
23	0.51	0.68	0.23	0.23	0.51	0.68	0.36	0.36
24	0.00	0.11	0.00	0.00	0.05	0.10	0.00	0.00
25	0.10	0.27	0.00	0.00	0.07	0.29	0.00	0.00
26	0.76	1.00	0.46	1.00	0.68	1.00	0.28	0.98
27	0.04	0.10	0.00	0.00	0.03	0.10	0.00	0.00
28	0.30	0.85	0.00	0.72	0.24	0.86	0.00	0.53
29	0.77	0.95	0.00	0.72	0.77	0.95	0.00	0.72

## BIBLIOGRAFIA

- Albizzati Mantegazza S., Gallina A., Mambretti S., Lewis C., “Designing CSO storage tanks in Italy: A comparison between normative criteria and dynamic modelling methods”, *Urban Water Journal*, 2010.
- Alley W.M., Smith P.E., “Estimation of accumulation parameters for urban runoff quality modeling”, *Water Resources Research*, Vol 17 N.6, 1657-1664, 1981.
- Arrigoni A.M., Villa A., “La qualità degli scarichi urbani nei recettori: effetti delle vasche di prima pioggia”, *Tesi di laurea* 2009.
- Artina S., Maglionico M., “Analisi comparativa di modelli per lo studio della qualità delle acque nelle reti di drenaggio urbano”, *Atti delle giornate di studio in memoria di Carlo Cao*, Cagliari, 18-20 novembre, 1998.
- Bertoletti A., Castelnovo D.P., “Algoritmi genetici per la ricerca perdite in reti di acquedotto”, *Tesi di Laurea*, Politecnico di Milano, 2011.
- Bertrand-Krajewski J.L., Chebbo G., Saget A., "Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon". *Water Resource Research* Vol. 32, N.8, pp 2341-2356, 1998.
- Bonomo L., *Dispense del corso di Trattamento delle Acque di Rifiuto 1*, 2005.

- Bornatici L., Ciaponi C., Papiri S., “Sul controllo degli scarichi fognari nei corpi idrici ricettori in tempo di pioggia attuato mediante scaricatori di piena e vasche di prima pioggia”, Pavia 2005.
- Bornatici L., Ciaponi C., Papiri S., “Le vasche di prima pioggia nel controllo della qualità degli scarichi fognari generati da eventi meteorici”, Atti dei seminari di Parma 5-6 febbraio 2004 e Cosenza 13-15, dicembre 2004.
- Bujon G., Herremans L.,” FLUPOL : Modèle de prévision des débits et des flux polluants en réseaux d'assainissement par temps de pluie. Calage et validation”, La Houille Blanche, N. 2, 123-140, 1990.
- Burton A., Kilsby C.G., Moaven-Hanshemi A., O’Connell P.E., “Neyman-Scott Rectangular Pulses Rainfall Simulation System”, BETWIXT Technical Briefing Note 2, Version 2, 2004.
- Burton A., “RainSim V3.1.1 User Documentation”, Copyright © University of Newcastle, 2008.
- Burton A., Kilsby C.G., Fowler H.J., Cowpertwait P.S.P., O’Connell P.E., “RainSim: A spatial-temporal stochastic rainfall modelling system”, Environmental Modelling & Software 23 1356–1369, 2008.
- Calenda G., Napolitano F.,”Parameter estimation of Neyman-Scott processes for temporal point rainfall simulation”, Journal of Hidrology, 255 (45-66), 1999.
- Ciaponi C., Papiri S., “Diagnosi dei problemi funzionali di sistemi di drenaggio urbano e definizione degli interventi correttivi ottimali”, Atti della II Conferenza Nazionale sul Drenaggio Urbano. Palermo (Italia), 10-12 maggio 2000.
- Ciaponi C., Mutti M., Papiri S., “Storm Water Quality in the Cascina Scala (Pavia, Italy) Experimental Catchment”, 2nd International Conference “New Trends in Water and Environmental Engineering for safety and Life: Eco-compatible Solutions for Aquatic Environments”. Capri (Italy), June 24-28 2002.

- Ciaponi C., Papiri S., Todeschini S., "Qualità delle acque meteoriche di dilavamento dei siti sperimentali di Cascina Scala (Pavia) e di Cremona", La Tutela Idrica E Ambientale Dei Territori Urbanizzati, Atti dei seminari. Parma (5-6 febbraio 2004) e Cosenza (13-15 dicembre 2004), 2005.
- Ciaponi C., Papiri S., Todeschini S., "Emerging issues in stormwater management connected to the potential precipitation changes in Italy", 6<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, NOVATECH2007, 24-28 June 2007, (vol.1, pp. 107-114).
- Cowpertwait P.S.P., "Further developments for precipitation systems", Met. Mag., Lond. 114, 293-319, 1991.
- Cowpertwait P.S.P., "A Generalized Point Process Model for Rainfall", Proc. R. Soc. Lond. Series A, 447, pp. 23-27, 1994.
- Cowpertwait P.S.P., O'Connell P.E., Metcalfe A.V., Mawdsley J.A., "Stochastic point process modeling of rainfall. I. Single-site fitting and validation", J.Hydrol., 175, pp. 17-46, 1996.
- Cowpertwait P.S.P., O'Connell P.E., "A regionalized Neyman-Scott Model of Rainfall with Convective and Stratiform Cells", Hydrol. Earth Sys. Sci., 1, pp. 71-80, 1997.
- Cowpertwait P.S.P., "A Poisson-cluster model of rainfall: some high-order moments and extreme values", Proc. R. Soc. Lond. A 454, 885-898, 1998.
- Cowpertwait P.S.P., "Mixed rectangular pulses models of rainfall", Hydrol. Earth Sys. Sci., 8(5), 993-1000, 2004.
- Cox D.R. & Isham V., "Point process" London, Chapman & Hall/CRC, 1980.

- Durrans S. R., Burian J., Nix S. J., Hajji A., Pitt R. E., Chi-Yuan Fan, Field R., “Polynomial-Based Disaggregation of Hourly Rainfall for Continuous Hydrologic Simulation”, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35 N.5 1213-1221, 1999.
- Eiben A.E., Smith J.E., “Introduction to Evolutionary Computing”, Springer, 2003.
- Einstein, H.A., “Formulas for the transportation of bed load”, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 107, 561–597, 1942.
- Entekhabi D., Rodriguez-Iturbe I., Eagleson P.S., “Probabilistic representation of the temporal rainfall process by a modified Neyman-Scott rectangular pulses model: parameter estimation and validation”, *Wat. Resour. Res.* 21, 1437-1455, 1989.
- Fowler H.J., Kilsby C.G., O’Connell P.E., “A stochastic rainfall model for the assessment of regional water resource system under changed climatic conditions”, *Hydrology & Earth System Sciences*, 4(2) (263-282), 2000.
- Franzetti S., Mambretti S., “Malpensa: studi della rete fognaria”, agosto 2008.
- Gaume E., Mouhous N., Andrieu H., “Rainfall stochastic disaggregation models: Calibration and validation of a multiplicative cascade model”, *Advances in Water Resources*, Vol 30, 1301-1319, 2007.
- Grimaldi S., Napolitano F., “Confronto tra due tecniche di generazione di serie sintetiche di precipitazione giornaliera”, 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza 16-19 settembre 2002.
- Gupta V. K., Waymire E. C., “A Statistical Analysis of Mesoscale as a Random Cascade”,



- 
- Hingray B., Haha M. B., "Statistical performances of various deterministic and stochastic models for rainfall series disaggregation", *Atmospheric Research*, N. 77 152-175, 2005.
  - Huber C., Dickinson R.E., "Storm Water management Model, Version 4: User's Manual", Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 1988.
  - Kiefer C.J. & Chu H.H., "Synthetic storm pattern for drainage design." *Journal of the Hydraulic Division of the ASCE*, 83(4), 13321-13325, 1957.
  - Kottegoda N., Rosso R., "Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers", seconda edizione, Blackwell Publishing, 2008.
  - Licznar P., Lomotowski J., Rupp D.E., "Random cascade driven disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator", *Atmospheric Research*, Vol 99, 563-578, 2011.
  - Mandelbrot, B., "Intermittent turbulence in self-similar cascades: Divergence of high moments of the carrier", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 62, 331-358, 1974.
  - Menadbe M., Harris D., Seed A., Austin G., Stow D., "Multiscaling properties of rainfall and bounded random cascades", *Water Resources Research*, Vol 33, 2823-2830, 1997.
  - Menadbe M., Sivapalan M., "Modelling of rainfall time series and extremes using bounded random cascades and Levy-stable distributions", *Water Resources Research*, Vol 36, 3292-3300, 2000.
  - Mignosa P., Paoletti A. Mambretti S., "Verifica del metodo razionale per il dimensionamento delle reti di drenaggio", atti dei seminari di Carloforte (CA), 1-3 ottobre 1992 e di Taormina (ME), 2-4 giugno 1993.
  - Molnar P., Burlando P., "Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by a simple random cascade model", *Atmospheric Research*, Vol 77, 137-151, 2005.

- Oliveri E., Viviani G., La Loggia G., "Comportamento ed efficienza delle vasche di pioggia", II Conferenza Nazionale sul Drenaggio Urbano, Palermo 10-12 maggio 2000.
- Onof C., Townend J., Kee R., "Comparison of two hourly to 5-min rainfall disaggregators", Atmospheric Research, Vol 77, 176-187, 2005.
- Ormsbee L. E., "Rainfall Disaggregation Model for Continuous Hydrologic Modeling", Journal of Hydraulic Engineering, vol 15 N. 4 507-525, 1989.
- Over T. M., "Modelling Space-Time Rainfall at the Mesoscale Using Random Cascades", PhD Thesis, University of Colorado, 1995.
- Over T. M., Gupta V. J., "Statistical analysis of mesoscale rainfall: dependence of random cascade generator on large-scale forcing", Journal of Applied Meteorology, Vol 33, 1526-1542, 1994.
- Over T. M., Gupta V. J., "A space-time theory of mesoscale rainfall using random cascades" Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. D21, PP. 26,319-26,331, 1996
- Paoletti A., Papiri S., "Sistemi fognari unitari e separati: aspetti funzionali e ambientali", Giornata Di Studio: "La Separazione Delle Acque Nelle Reti Fognarie Urbane", Roma, 25 Giugno 2003.
- Piga E., Salis M., Passoni G., "Analisi statistica delle piogge intense di breve e brevissima durata nell'area metropolitana di Milano", ed. Città Studi, Milano, 1990.
- Ranucci A., "L'efficienza delle vasche di prima pioggia nella riduzione dell'impatto nei corpi idrici ricettori", Tesi di dottorato, Università degli studi di Napoli, 2009.
- Rodriguez-Iturbe I., Gupta V.K., Waymire E., "A Spectral Theory of Rainfall Intensity at the Meso- $\beta$  Scale", Wat. Resour. Res, vol. 20, no. 10, 1453-1465, 1984.

- Rodriguez-Iturbe I., Cox D.R., Isham V., “Some models for rainfall based on stochastic point processes”, *Proc. R. Soc. Lond. A* 410, 269-288, 1987.
- Saget A., Chebbo G., Bertrand Krajewski J.L., “The first flush in sewer systems.”, *Wat. Sci. Tech.*, Vol.33, No. 9, 101-108, 1996.
- Todeschini S., “Il controllo degli scarichi fognari di tempo di pioggia mediante vasche di prima pioggia: aspetti progettuali e gestionali”, Tesi di Dottorato in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Pavia 2007.
- Todorovic P. & Yevjevic V., “Stochastic process of precipitation”, *Hydrol. Pap.* 35, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1969.
- Vanmarcke E., “Random Fields: Analysis and Synthesis”, MIT Press, Cambridge, MA, p. 382, 1983.
- Yaglom A.M., “The influence on the fluctuation in energy dissipation on the shape of turbulent characteristics in the inertial interval”, *Soviet Physics-Doklady* 2, 26-30, 1966.