

Eventi meteorici critici per la qualità delle acque di drenaggio urbano

G. Becciu, A. Paoletti, U. Sanfilippo, R. Begnis

Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento, Politecnico di Milano

Sommario. Le acque di pioggia possono avere un impatto notevole sull'ecosistema dei corpi idrici ricettori a causa dei carichi inquinanti da esse veicolati. Lo studio qui presentato sulla formazione dei deflussi meteorici nei bacini urbani, basato su due ben diverse lunghe serie pluviometriche e su differenti andamenti dei fenomeni di accumulo e dilavamento, ha permesso di accertare in primo luogo che eventi critici che conducono ai valori massimi del carico inquinante entrante nella rete fognaria sono abbastanza frequenti nel normale regime pluviometrico e, in secondo luogo, che è possibile predefinire particolari eventi sintetici atti a provocare il massimo impatto e quindi utili per lo studio delle strategie strutturali o gestionali di controllo.

1. Introduzione

Lo studio dell'impatto sui corpi idrici ricettori causato in tempo piovoso dagli scarichi di piena di una rete fognaria richiede una complessa modellazione matematica finalizzata a determinare sia il degrado temporaneo che avviene durante il singolo evento piovoso sia, nel caso in cui la capacità autodepurativa del ricettore non consenta il pieno recupero della qualità delle acque dopo ogni evento, l'effetto cumulato provocato nel lungo periodo dalla serie continua degli scarichi. Si tratta di modellazioni molto complesse la cui affidabilità dipende in modo decisivo dalla disponibilità di dettagliati dati sperimentali quali-quantitativi registrati in rete e nel ricettore nel corso di eventi quanto più numerosi possibile.

L'analisi completa del problema può essere suddivisa in quattro fasi principali:

- a) accumulo degli inquinanti sulla superficie del bacino nei periodi di tempo asciutto;
- b) dilavamento in tempo piovoso della superficie del bacino per opera degli scorrimenti superficiali che si formano fino ai manufatti di ingresso (caditoie) nelle reti fognarie;
- c) ingresso nelle caditoie e formazione dei deflussi all'interno della rete, con risospensione dei materiali ivi precedentemente sedimentati e, nel caso di fognature unitarie, con miscelazione con le altre acque reflue, fino ai manufatti di scarico;
- d) immissione nei ricettori delle correnti idriche e dei corrispondenti carichi inquinati veicolati dagli scarichi della rete fognaria e conseguenti fenomeni di diffusione, dispersione e trasporto.

Anche se l'impatto sui ricettori deriva ovviamente da tutto il complesso della fenomenologia prima richiamata, l'analisi delle sole componenti a) e b) può consentire di enucleare i caratteri delle "sorgenti" dell'inquinamento meteorico urbano e quindi di individuare particolari combinazioni "critiche" della durata del tempo secco e delle grandezze caratterizzanti il successivo evento piovoso, idonee alla formulazione di ipotesi progettuali o gestionali di controllo dell'inquinamento.

Negli anni recenti la ricerca scientifica del settore si è diffusamente dedicata agli studi sperimentali e teorici di tali tematiche, dal momento che è emerso in modo sempre più chiaro che il conseguimento degli obiettivi di qualità dei corpi idrici ricettori impone di procedere, in misura più o meno spinta, al controllo qualitativo delle acque meteoriche urbane, oltre che a quello tradizionale delle acque reflue. A tale proposito sono numerosi i contributi sperimentali e interpretativi sui fenomeni di trasporto in tempo piovoso degli inquinanti in rete e nei ricettori registrati nel corso di singoli eventi reali o ricostruiti per eventi sintetici (Artina et al., 1998, 2000); tuttavia, ben meno indagati sono gli aspetti statistici conseguenti alla successione continua degli eventi piovosi e dei corrispondenti intervalli di tempo secco. Recentemente è stato proposto da alcuni Autori (Maglionico, 1998; Maglionico e Zappi, 1998), sulla base della simulazione continua della serie pluviometrica registrata nella città di Bologna nel periodo 1994-1997, un particolare criterio di classificazione della gravità ambientale degli eventi, basato sulla correlazione da loro accertata tra la portata massima dei solidi veicolati al ricettore durante l'evento

piovosio e un particolare parametro che sinteticamente tiene conto sia della quantità di solido presente all'inizio dell'evento, funzione della massa residua al termine dell'evento precedente e della durata dell'intervallo di tempo secco, sia della capacità di dilavamento dell'evento stesso, rappresentata dalla sua intensità al colmo. La metodologia proposta dai detti Autori offre certamente un contributo innovativo per verificare, nella scala di gravità degli eventi, quali siano i provvedimenti strutturali o non strutturali atti a contenere l'impatto sul ricettore entro limiti prefissati. Essa però richiede, al fine di classificare gli eventi in ordine di gravità, di procedere alla simulazione complessiva delle prima richiamate fasi a), b), c), d).

Significativamente maggiore sarebbe l'utilità di una metodologia, calibrata statisticamente sulla base di estese simulazioni numeriche, che consentisse di predefinire a priori, a partire dalle sole caratteristiche del regime pluviometrico, quei particolari eventi critici che conducono ai valori massimi o del carico inquinante o della sua concentrazione entrante nella rete. Tale tema è sviluppato nella presente memoria indagando i meccanismi di accumulo in tempo secco e dilavamento in tempo piovoso sulla falda superficiale elementare impermeabile che si suppone afferente a una singola caditoia d'ingresso nella rete fognaria. Naturalmente la limitata superficie di tale falda consente di ritenere del tutto trascurabile l'effetto della trasformazione afflussi-deflussi (in altri termini, è trascurabile il tempo di risposta della falda), con la conseguenza che lo ietogramma stesso rappresenta direttamente l'idrogramma entrante nella caditoia.

Le indagini qui presentate, basate su due ben diverse lunghe serie pluviometriche e su differenti andamenti dei fenomeni di accumulo e dilavamento, conducono ad accertare in primo luogo che gli "eventi critici", nel senso prima precisato, sono abbastanza frequenti nel normale regime pluviometrico, e, in secondo luogo, che è possibile predefinire particolari eventi sintetici atti a provocare il massimo impatto e quindi utili per lo studio delle strategie strutturali o gestionali di controllo.

2. Simulazione dei fenomeni di accumulo

I modelli di accumulo normalmente consigliati dalla letteratura (AA.VV., 1997) rispondono a leggi empiriche di tipo esponenziale, come ad esempio il modello di Huber e Dickinson (1988) presente nel codice di calcolo SWMM:

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

dove: $Ma(t)$ è la massa accumulata parziale sul bacino al tempo t [kg/ha];
 $Accu$ è il coefficiente di accumulo [kg/(ha·d)];
 $Disp$ è il coefficiente di scomparsa [d⁻¹];
 t_s è la durata del tempo secco antecedente [d].

In tale modello il rapporto $Accu/Disp$ rappresenta il valore massimo verso cui tende la massa accumulabile sul bacino, nell'ipotesi che l'accumulo stesso sia asintoticamente limitato dall'azione erosiva esercitata dal vento, dal traffico e dalla degradazione biologica e biochimica.

Di fondamentale importanza è la taratura dei parametri, poiché anche in letteratura si trovano indicazioni alquanto generiche sui possibili valori da riferire al bacino in esame; ad esempio alcune indagini sperimentali (Alley, 1981; Alley e Smith, 1981; Bujon e Herremans, 1990) hanno stabilito che il coefficiente di accumulo $Accu$ è funzione del tipo di urbanizzazione:

zone residenziali altamente abitate	10÷25 kg/(ha·d),
zone residenziali scarsamente abitate	5÷6 kg/(ha·d),
zone commerciali	15 kg/(ha·d),
zone industriali	35 kg/(ha·d).

Riguardo il coefficiente di scomparsa $Disp$, Novotny et al. (1978; 1985) hanno valutato che su alcuni bacini americani esso varia tra 0,2 d⁻¹ e 0,4 d⁻¹, mentre da sperimentazioni francesi tale coefficiente è stato stimato in 0,08 d⁻¹ (Bujon, 1988).

Dato che i risultati delle simulazioni sono fortemente influenzati dai parametri utilizzati, si vuole qui investigare gli estremi opposti degli intervalli di variabilità di letteratura, valutando sia gli effetti di un accumulo lento, assegnando ai coefficienti $Accu$ e $Disp$ valori rispettivamente di 8 kg/(ha·d) e 0,08 d⁻¹, che di un accumulo rapido, assegnando agli stessi coefficienti valori di 32 kg/(ha·d) e 0,4 d⁻¹; in particolare i valori del modello lento sono pari a quelli già adottati sul bacino sperimentale del Fossolo a Bologna (Artina et al., 1998). Si può osservare dalla Fig. 1a quanto ampio sia il campo di variabilità della massa limite $Accu/Disp$ in funzione dei valori di letteratura per i parametri $Accu$ e $Disp$, mentre dalla Fig. 1b come nei due casi specifici considerati gli andamenti delle masse accumulate siano

sensibilmente differenti; ad esempio, il 98% della massa di saturazione viene raggiunto in soli 10 giorni circa di tempo secco dal modello rapido ($Accu = 32 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{d})$ e $Disp = 0,4 \text{ d}^{-1}$) e in circa 40 giorni da quello lento ($Accu = 8 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{d})$ e $Disp = 0,08 \text{ d}^{-1}$).

In generale, un accumulo esponenziale rapido tende a ridurre, rispetto a uno di tipo lento, l'influenza della durata del tempo secco sul valore del carico inquinante all'ingresso in fognatura, poiché la massa accumulata raggiunge valori prossimi alla saturazione già per un tempo secco breve, e quindi divengono prevalenti, per la determinazione del fenomeno, le caratteristiche del successivo dilavamento conseguente alla dinamica dell'afflusso meteorico.

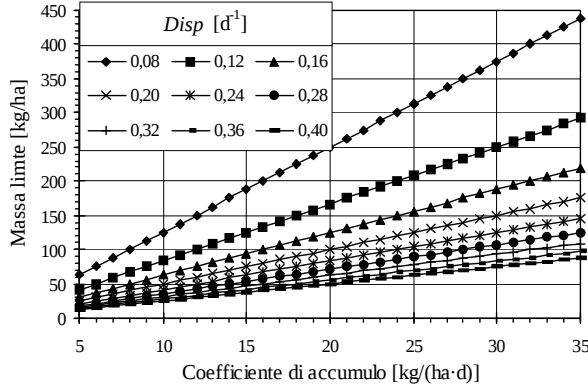


Fig. 1a – Variabilità della massa limite $Accu/Disp$ nel campo dei valori di $Accu$ e $Disp$ indicati in letteratura.

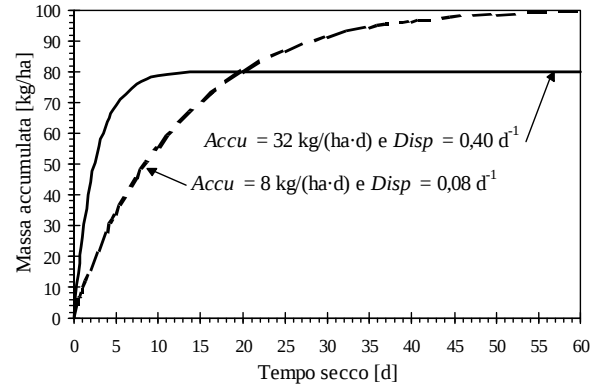


Fig. 1b – Confronto fra un accumulo esponenziale di tipo lento, con $Accu = 8 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{d})$ e $Disp = 0,08 \text{ d}^{-1}$, e uno di tipo rapido, con $Accu = 32 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{d})$ e $Disp = 0,4 \text{ d}^{-1}$.

3. Simulazione dei fenomeni di dilavamento

Il dilavamento operato dagli eventi meteorici viene usualmente rappresentato con leggi empiriche di tipo esponenziale (AA.VV., 1997), quali il modello SWMM (Alley, 1981; Huber e Dickinson, 1988) e quello di Sartor et al. (1974). Tuttavia nel seguito verranno riportati i risultati limitatamente a quanto ottenuto attraverso la formulazione più recente del modello SWMM (Huber, 1986), di validità più generale in virtù dei suoi due parametri di taratura contro l'unico presente nel modello di Sartor e nella formulazione originaria dello stesso modello SWMM (Metcalf & Eddy et al., 1971). Tale modello SWMM a due parametri ha una forma differenziale del tipo:

$$\frac{d Md(t)}{dt} = - \frac{d Ma(t)}{dt} = Ma(t) \cdot Arra \cdot i(t)^{wash} \quad (2)$$

che integrata diviene:

$$Md(t + \Delta t) - Md(t) = Ma(t) \cdot (1 - e^{-Arra \cdot i(t)^{wash} \cdot \Delta t}) \quad (2')$$

avendo chiamato, utilizzando la simbologia di letteratura:

- $Md(t + \Delta t)$ la massa dilavata al tempo $t + \Delta t$ [kg/ha];
- $Md(t)$ la massa dilavata al tempo t [kg/ha];
- $Ma(t)$ la massa totale presente sul bacino al tempo t [kg/ha];
- $Arra$ il coefficiente di lavaggio avente dimensioni $[\text{lunghezza}^{-wash} \cdot \text{tempo}^{(wash-1)}]$ (*);
- $wash$ un parametro numerico;
- Δt il passo temporale di calcolo (ad esempio 5 minuti) [ore];
- $i(t)$ l'intensità media di precipitazione nel passo temporale di calcolo $[\text{lunghezza} \cdot \text{tempo}^{-1}]$.

In generale, i valori di taratura per i parametri $Arra$ e $wash$ dipendono dal tipo di sostanza dilavata, dalle caratteristiche del bacino e, invero, anche dalla pioggia. Per quanto concerne in particolare $Arra$,

(*) Nella formulazione originaria del modello SWMM, ovvero prima che venisse introdotto nella (2) l'esponente $wash$, il parametro $Arra$ aveva, rigorosamente, le dimensioni dell'inverso di una lunghezza. Tuttavia, anche dopo l'introduzione del coefficiente $wash$ nella (2) da parte delle successive formulazioni del modello SWMM, sovente in letteratura si continuano a esprimere i valori di $Arra$ con le dimensioni dell'inverso di una lunghezza.

in letteratura sono suggeriti valori compresi fra 2,9 e 9,3 pollici^{-wash}·ora^(wash-1) per piogge rispettivamente da 0,2 a 0,8 pollici/ora e materiali di tipo sedimentabile (Ammon, 1979), ma valori ben inferiori per sostanze disciolte (Sueishi et al., 1984). Pure per wash si riscontra una certa variabilità in letteratura, ove sono riportati valori compresi sia fra 1 e 3, relativamente a sostanze sedimentabili (Huber, 1986), che fra 0 e 1, relativamente a sostanze solubili (Nakamura, 1984).

A parità di wash, volendo esprimere il coefficiente di lavaggio in mm^{-wash}·ora^(wash-1) e l'intensità di pioggia in mm/ora, nelle relazioni (2) e (2') occorre moltiplicare per 25,4^{-wash} il valore di Arra espresso in pollici^{-wash}·ora^(wash-1).

Per mezzo di un modello di tal tipo, aggiornando a ogni *j*-esimo passo temporale Δt di discretizzazione dell'evento la massa presente sul bacino a seguito del dilavamento operato dalla intensità media del

j-esimo Δt esaminato, è possibile calcolare la massa dilavata totale da ogni *n*-esimo evento $M_{d_{tot}}[n]$ come sommatoria delle masse dilavate in ciascun Δt .

Anche in questo caso una pur speditiva analisi di sensitività permette di stabilire l'influenza dei parametri Arra e wash sulla massa dilavata e quindi sulla concentrazione di inquinanti e sulla portata in massa. In particolare, assegnando al parametro Arra i valori minimo, medio e massimo degli intervalli suggeriti nella letteratura anglosassone per materiali di tipo sedimentabile (Ammon, 1979), ossia:

$$Arra = 2,9, 6,1 \text{ e } 9,3 \text{ pollici}^{-wash} \cdot \text{ora}^{(wash-1)}$$

e a wash i seguenti valori:

$$wash = 0,5, 1, 1,5 \text{ e } 2,$$

dalla Fig. 2 si può osservare l'influenza di wash e di Arra ai fini della valutazione della massa dilavata e che, per alcune combinazioni di Arra e wash, bastano piogge di normale intensità per dilavare una parte significativa della massa accumulata. Inoltre la Tab. 1 riporta i valori assunti da Arra utilizzando le unità di misura metriche decimali.

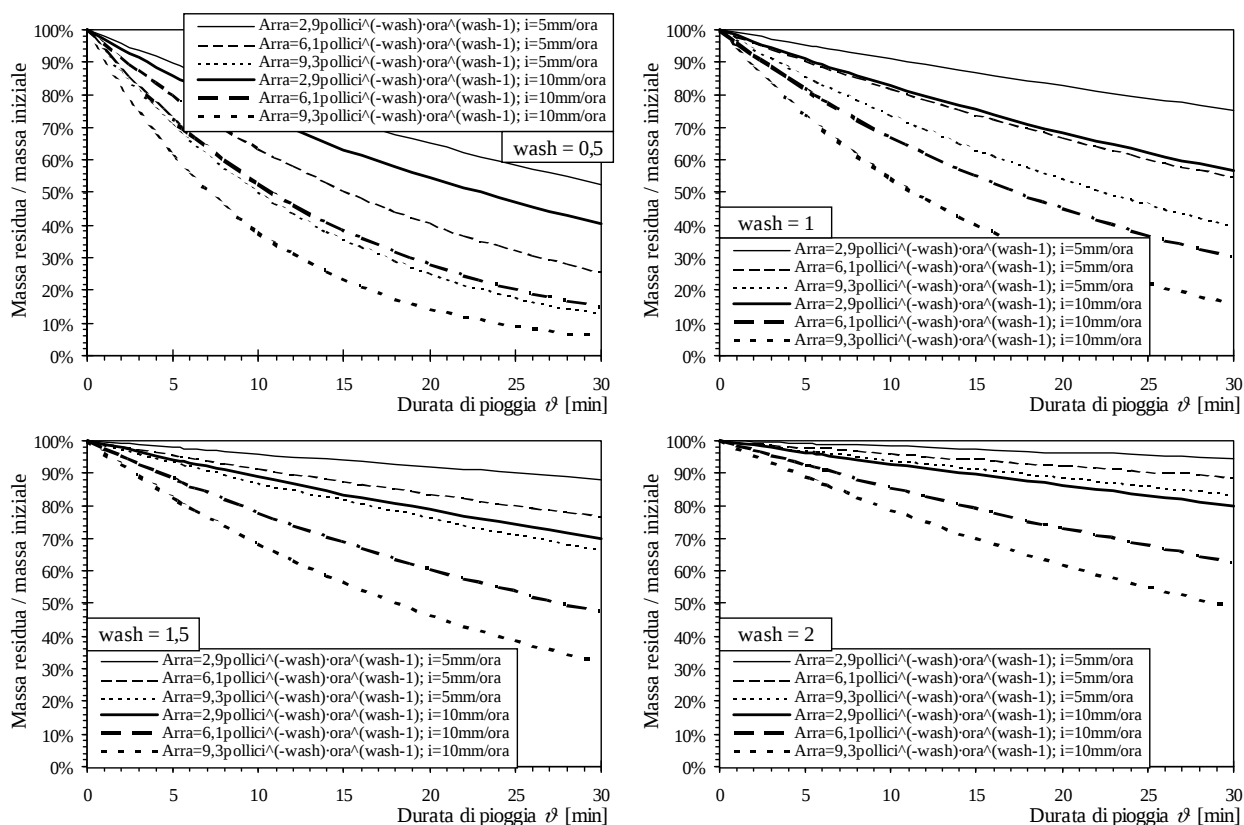


Fig. 2 – Dilavamento operato da una pioggia di intensità costante *i* pari a 5 e 10 mm/ora al variare di Arra e wash.

$Arra$ [pollici ^{-wash} · ora ^(wash-1)]	$Arra$ [mm ^{-wash} · ora ^(wash-1)]			
	$wash = 0,5$	$wash = 1$	$wash = 1,5$	$wash = 2$
2,9	0,575	0,114	0,023	0,004
6,1	1,210	0,240	0,048	0,009
9,3	1,845	0,366	0,073	0,014

Tab. 1 – Valori assunti da $Arra$ in mm^{-wash} · ora^(wash-1) per $Arra = 2,9, 6,1$ e $9,3$ pollici^{-wash} · ora^(wash-1) e $wash = 0,5, 1, 1,5$ e 2 .

4. Concetto di tempo secco equivalente

Dall'espressione dell'accumulo (1) è possibile calcolare il tempo secco “virtuale” t_{sv} corrispondente alla massa residua Ma_r rimasta sul bacino alla fine di un evento meteorico:

$$t_{sv} = \frac{1}{Disp} \cdot \ln \left(\frac{Accu}{Accu - Disp \cdot Ma_r} \right) \quad (3)$$

Si può quindi introdurre il concetto di tempo secco “equivalente” t_{se} (Maglionico, 1998; Begnis, 2000), che, per un generico evento n -esimo, è costituito dalla somma del tempo secco reale t_{sr} antecedente e del tempo secco virtuale t_{sv} corrispondente alla massa residua Ma_r rimasta alla fine dell'evento $n-1$:

$$t_{se}[n] = t_{sr}[n] + t_{sv}[n] = t_{sr}[n] + \frac{1}{Disp} \cdot \ln \left(\frac{Accu}{Accu - Disp \cdot Ma_r[n-1]} \right) \quad (3')$$

Ne consegue che il tempo secco equivalente t_{se} è sempre maggiore del tempo secco reale t_{sr} , essendo $0 < Ma_r < Accu/Disp$ in virtù della relazione (1); al limite, quando la massa residua Ma_r è molto scarsa, il valore di t_{se} tende a coincidere con quello di t_{sr} .

Infine, sostituendo nella formula di accumulo (1) alla variabile t_s il valore del t_{se} , si ottiene la massa accumulata totale Ma_{tot} presente all'inizio dell' n -esimo evento, la quale tiene dunque conto sia dell'accumulo dovuto al tempo secco reale t_{sr} che della Ma_r rimasta alla fine dell'evento precedente.

5. Processi piovosi analizzati

Per questo studio sono utilizzate due serie di piogge storiche, rispettivamente quella di Milano - via Monviso negli anni 1971-1991 e quella della città danese di Odense negli anni 1936-1941 e 1952-1979, diverse sia dal punto di vista climatico che per il livello di discretizzazione dei dati disponibili; infatti, sebbene entrambe abbiano dettaglio temporale pari a 5 minuti (pur avendo la serie di Milano un dettaglio di ½ minuto in origine, è qui considerato il passo di 5 minuti per omogeneità con la serie di Odense) e considerino 1 ora di tempo secco reale come intervallo minimo fra due eventi successivi (nel seguito indicato come *IET*, acronimo del termine inglese “Inter Event Time”), i dati della serie di Milano comprendono tutte le piogge di altezza pari almeno ad $h_{min} = 0,4$ mm, mentre quella di Odense trascura gli eventi con altezza inferiore a 3 mm. Tale disomogeneità dei dati ha tra l'altro permesso di stabilire che un campionamento delle piogge più raffinato (confronto fra Milano con $h_{min} = 0,4$ mm e Milano con $h_{min} = 3$ mm) può incidere sulla caratterizzazione statistica della serie più della diversità climatica (confronto fra Odense con $h_{min} = 3$ mm e Milano con $h_{min} = 3$ mm) fra le due serie campione, le cui caratteristiche principali sono riportate nella seguente Tab. 2.

Caratteristica:	Serie di:	Milano, $IET = 1$ ora e $h_{min} = 0,4$ mm	Odense, $IET = 1$ ora e $h_{min} = 3$ mm	Milano, $IET = 1$ ora e $h_{min} = 3$ mm
N° di anni		21	33	21
N° di eventi totali		2922	1570	1296
N° di eventi per anno E_v medio		139	48	62
Deviazione standard di E_v		25	12	7
Pioggia media annua h_{tot} [mm]		985,3	330,7	903,2
Deviazione standard di h_{tot} [mm]		216,3	62,8	212,9
Tempo secco reale t_{sr} medio [d]		2,4	7,5	5,4
Tempo secco reale t_{sr} massimo [d]		61,2	99,3	89,9
Deviazione standard di t_{sr} [d]		5,2	10,6	8,9
Coefficiente di variazione di t_{sr}		2,1	1,4	1,6
Int. di picco i_{max} media [mm/ora]		8,8	9,5	16,8
Deviaz. standard di i_{max} [mm/ora]		16,8	11,7	23,2
Durata ϑ media [ore]		3,8	4,2	6,6
Deviazione standard di ϑ [ore]		4,1	3,0	6,8

Tab. 2 – Caratteristiche principali delle serie pluviometriche storiche considerate.

Come già detto, un parametro fondamentale per valutare l'accumulo degli inquinanti sulle superfici è il tempo secco reale t_{sr} antecedente all'evento di pioggia, inteso come il tempo che intercorre tra la fine di un evento e l'inizio di quello successivo.

Le elaborazioni statistiche compiute sulle serie considerate hanno evidenziato che:

- i campioni di tempo secco reale t_{sr} si adattano alla distribuzione esponenziale;
- i campioni di intensità massima i_{max} si adattano alla distribuzione log-normale;
- i campioni di durata ϑ si adattano alla distribuzione esponenziale;
- i campioni dei massimi annuali di tempo secco reale t_{sr} si adattano alla distribuzione di Gumbel;
- i campioni dei massimi mensili di tempo secco reale t_{sr} si adattano alla distribuzione esponenziale;
- il campione di numero di eventi per anno E_v si adatta alla distribuzione di Poisson.

I valori dei momenti del primo e del secondo ordine delle distribuzioni sono riportati nella Tab. 2.

6. Modello di calcolo

È stato predisposto un programma di calcolo allo scopo di valutare, simulando in continuo i fenomeni di accumulo e dilavamento rispetto alle sopra citate serie pluviometriche di Odense e di Milano, l'incidenza dei vari parametri coinvolti nella modellazione della qualità delle acque in ingresso in caditoia, senza però simulare i successivi fenomeni idrodinamici nella rete di drenaggio (Begniss, 2000). Il programma elaborato permette all'utente di combinare fra loro in vario modo le principali espressioni di letteratura che modellano i fenomeni di accumulo, dilavamento e pulizia stradale.

Le elaborazioni svolte dal programma di calcolo sui dati pluviometrici forniscono le caratteristiche pluviometriche di ogni evento: intensità massima i_{max} [mm/ora] nel passo $\Delta t = 5$ minuti, intensità media i_m [mm/ora], durata ϑ [minuti], tempo di picco t_p [minuti] (inteso come il tempo in cui si verifica l'intensità massima, contato dall'inizio dell'evento) e volume d'acqua defluito Vd_{tot} [m³] durante l'evento.

Le simulazioni effettuate, riferite ai modelli esposti nei paragrafi precedenti, calcolano per ogni evento le seguenti grandezze: tempo secco reale t_{sr} [d], massa accumulata parziale Ma_p [kg], massa accumulata totale Ma_{tot} [kg], massa dilavata totale Md_{tot} [kg], massa accumulata residua Ma_r [kg], tempo secco equivalente t_{se} [d], portata in massa massima Qm_{max} [kg/ora], concentrazione massima C_{max} [kg/m³], portata in massa media Qm_m [kg/ora], concentrazione media C_m [kg/m³].

7. Analisi dei risultati

Le elaborazioni eseguite con detto modello hanno preso in considerazione le leggi di accumulo e dilavamento descritte rispettivamente dalla (1) e dalla (2'). Ipotizzando valori dei parametri relativi a processi rapidi o lenti per sostanze inquinanti di tipo sedimentabile (ovvero caratterizzate da $wash > 1$), il modello ha permesso di calcolare, per ciascun evento delle serie pluviometriche, i valori di:

- carico Md_{tot} [kg/ha] complessivamente entrato nella caditoia,
- massima portata in massa di inquinante Qm_{max} [kg/(ha·ora)] entrante nella caditoia,

- massima concentrazione C_{max} [kg/m³] del pollutogramma entrante nella caditoia.

Tali valori risultano assai variabili da evento a evento e a seconda della scelta operata per i parametri delle leggi (1) e (2'), della dinamica temporale di ciascun evento e della durata del tempo secco precedente. La Tab. 3 riporta, a titolo di esempio, i coefficienti di correlazione fra differenti grandezze caratteristiche degli eventi per le serie pluviometriche di Milano (a) e di Odense (b), in entrambi i casi con dilavamento SWMM di tipo lento ($Arra = 2,9$ pollici^{-wash}·ora^(wash-1), $wash = 1,5$) e con accumulo di tipo sia rapido ($Accu = 32$ kg/(ha·d); $Disp = 0,4$ d⁻¹) che lento ($Accu = 8$ kg/(ha·d); $Disp = 0,08$ d⁻¹).

Come si evince dalla Tab. 3, che peraltro è rappresentativa anche degli altri casi, in prevalenza i massimi di correlazione si verificano con i_{max} , i_m , $i_{max} \cdot t_{se}$ e $i_m \cdot t_{se}$, mentre appaiono via via più deboli le correlazioni con gli altri parametri. In particolare, i parametri $i_{max} \cdot t_{se}$ e $i_m \cdot t_{se}$ risultano significativi nel caso di accumulo lento, come già osservato da altri Autori (Maglionico, 1998).

MILANO	Accumulo lento ($Accu = 8$ kg/(ha·d); $Disp = 0,08$ d ⁻¹)								Accumulo rapido ($Accu = 32$ kg/(ha·d); $Disp = 0,4$ d ⁻¹)							
correlazione	i_{max}	i_m	t_p	t_{sr}	t_{se}	t_p/θ	$i_{max} \cdot t_{se}$	$i_m \cdot t_{se}$	i_{max}	i_m	t_p	t_{sr}	t_{se}	t_p/θ	$i_{max} \cdot t_{se}$	$i_m \cdot t_{se}$
C_m	0,22	0,28	-0,24	0,50	0,58	-0,14	0,43	0,57	0,29	0,39	-0,32	0,31	0,33	-0,16	0,32	0,47
C_{max}	0,39	0,33	-0,18	0,56	0,63	-0,13	0,62	0,66	0,53	0,47	-0,27	0,36	0,38	-0,16	0,50	0,57
C_{max}/Ma_{tot}	0,70	0,61	-0,40	0,04	-0,06	-0,16	0,40	0,39	0,70	0,61	-0,40	0,04	0,00	-0,16	0,37	0,39
$C_{max} \cdot Vd/Ma_{tot}$	0,63	0,33	0,23	0,05	0,02	0,10	0,35	0,23	0,63	0,33	0,22	0,05	0,04	0,10	0,31	0,22
C_m/Ma_{tot}	0,35	0,48	-0,46	0,01	-0,06	-0,17	0,19	0,30	0,35	0,48	-0,46	0,01	-0,01	-0,17	0,18	0,29
Qm_m	0,45	0,70	-0,19	0,21	0,21	0,05	0,46	0,75	0,50	0,79	-0,20	0,12	0,11	0,09	0,32	0,58
Qm_{max}	0,72	0,54	-0,22	0,28	0,25	-0,11	0,72	0,67	0,81	0,60	-0,25	0,18	0,17	-0,12	0,57	0,54
Qm_{max}/Ma_{tot}	0,88	0,64	-0,27	0,07	-0,01	-0,12	0,51	0,44	0,88	0,64	-0,27	0,07	0,04	-0,12	0,47	0,43
$Qm_{max} \cdot \theta/Ma_{tot}$	0,53	0,14	0,00	0,07	0,02	-0,11	0,33	0,12	0,53	0,14	0,00	0,07	0,05	-0,11	0,31	0,13
$Qm_{max} \cdot t_{sr}/Ma_{tot}$	0,51	0,34	-0,15	0,50	0,41	-0,06	0,86	0,70	0,51	0,34	-0,15	0,50	0,48	-0,06	0,88	0,76
$Qm_{max} \cdot t_{se}/Ma_{tot}$	0,60	0,43	-0,17	0,42	0,40	-0,07	0,88	0,78	0,57	0,39	-0,16	0,47	0,46	-0,07	0,88	0,77
$Qm_{max} \cdot t_p/Ma_{tot}$	0,40	0,10	0,43	0,01	0,00	0,39	0,24	0,07	0,40	0,10	0,43	0,01	0,01	0,39	0,20	0,07
Qm_m/Ma_{tot}	0,54	0,83	-0,22	0,03	-0,02	0,15	0,29	0,51	0,54	0,83	-0,22	0,03	0,01	0,15	0,25	0,47
Md_{tot}	0,43	0,30	0,26	0,46	0,53	0,00	0,60	0,57	0,56	0,40	0,25	0,29	0,31	0,02	0,48	0,47

(a)

ODENSE	Accumulo lento ($Accu = 8$ kg/(ha·d); $Disp = 0,08$ d ⁻¹)								Accumulo rapido ($Accu = 32$ kg/(ha·d); $Disp = 0,4$ d ⁻¹)							
correlazione	i_{max}	i_m	t_p	t_{sr}	t_{se}	t_p/θ	$i_{max} \cdot t_{se}$	$i_m \cdot t_{se}$	i_{max}	i_m	t_p	t_{sr}	t_{se}	t_p/θ	$i_{max} \cdot t_{se}$	$i_m \cdot t_{se}$
C_m	0,46	0,46	-0,15	0,34	0,41	0,10	0,69	0,75	0,58	0,61	-0,16	0,12	0,12	0,16	0,58	0,61
C_{max}	0,52	0,40	-0,15	0,39	0,47	-0,01	0,76	0,72	0,69	0,56	-0,16	0,16	0,16	0,04	0,67	0,58
C_{max}/Ma_{tot}	0,81	0,70	-0,16	-0,05	-0,17	0,08	0,57	0,50	0,81	0,70	-0,16	-0,05	-0,09	0,08	0,53	0,44
$C_{max} \cdot Vd/Ma_{tot}$	0,73	0,49	0,21	-0,04	-0,10	0,14	0,57	0,35	0,73	0,49	0,21	-0,04	-0,05	0,14	0,45	0,30
C_m/Ma_{tot}	0,66	0,73	-0,16	-0,07	-0,18	0,20	0,47	0,51	0,66	0,73	-0,16	-0,07	-0,10	0,20	0,43	0,46
Qm_m	0,65	0,86	-0,12	0,07	0,04	0,11	0,66	0,86	0,67	0,91	-0,13	0,01	0,00	0,12	0,53	0,69
Qm_{max}	0,88	0,67	-0,10	0,08	0,05	0,05	0,89	0,72	0,93	0,72	-0,11	0,02	0,01	0,06	0,73	0,57
Qm_{max}/Ma_{tot}	0,96	0,77	-0,11	-0,03	-0,10	0,07	0,72	0,57	0,96	0,77	-0,11	-0,03	-0,06	0,07	0,63	0,48
$Qm_{max} \cdot \theta/Ma_{tot}$	0,69	0,24	0,12	-0,03	-0,08	0,06	0,49	0,18	0,69	0,24	0,12	-0,03	-0,04	0,06	0,43	0,15
$Qm_{max} \cdot t_{sr}/Ma_{tot}$	0,54	0,40	-0,08	0,37	0,27	0,02	0,84	0,71	0,54	0,40	-0,08	0,37	0,35	0,02	0,94	0,80
$Qm_{max} \cdot t_{se}/Ma_{tot}$	0,75	0,55	-0,09	0,22	0,21	0,03	0,97	0,79	0,66	0,48	-0,09	0,31	0,30	0,03	0,97	0,80
$Qm_{max} \cdot t_p/Ma_{tot}$	0,52	0,21	0,49	-0,06	-0,11	0,52	0,35	0,14	0,52	0,21	0,49	-0,06	-0,07	0,51	0,31	0,12
Qm_m/Ma_{tot}	0,67	0,95	-0,13	-0,04	-0,11	0,13	0,47	0,65	0,67	0,95	-0,13	-0,04	-0,06	0,13	0,42	0,56
Md_{tot}	0,64	0,48	0,21	0,18	0,21	0,19	0,75	0,65	0,72	0,55	0,23	0,05	0,05	0,22	0,60	0,48

(b)

Tab. 3 – Coefficienti di correlazione fra differenti grandezze caratteristiche degli eventi per le serie pluviometriche di Milano (a) e di Odense (b), in entrambi i casi con dilavamento SWMM di tipo lento ($Arra = 2,9$ pollici^{-wash}·ora^(wash-1), $wash = 1,5$).
Con fondo grigio sono evidenziati i valori massimi per ogni riga.

Ancora con riferimento a sostanze inquinanti di tipo sedimentabile (ovvero caratterizzate da $wash > 1$), la Fig. 3 e la Fig. 4, dove per ciascun evento sono diagrammati in funzione di i_{max} rispettivamente i rapporti Qm_{max}/Ma_{tot} e C_{max}/Ma_{tot} , mostrano che, pur in presenza di una notevole

dispersione dei risultati, che d'altra parte è da attendersi, i punti dei diagrammi sono sottesi da curve inviluppo lungo le quali giacciono gli eventi che comportano il massimo impatto. In particolare nella Fig. 3, che riporta Qm_{max}/Ma_{tot} in funzione di i_{max} , i punti sono sottesi da una curva inviluppo la cui espressione può essere trovata osservando che Qm_{max} dipende, per la (2'), da Ma_{tot} oltre che da i_{max} ; infatti, per un certo i_{max} , il più elevato valore raggiungibile da Qm_{max} si ha quando i_{max} avviene all'inizio dell'evento, cioè quando $Ma(t) = Ma_{tot}$. Ne consegue che la curva inviluppo ha l'espressione:

$$\frac{Qm_{max}}{Ma_{tot}} = \frac{Md_{max}/\Delta t}{Ma_{tot}} = \frac{Ma_{tot} \cdot (1 - e^{-Arra \cdot (i_{max})^{wash} \cdot \Delta t})}{Ma_{tot} \cdot \Delta t} = \frac{(1 - e^{-Arra \cdot (i_{max})^{wash} \cdot \Delta t})}{\Delta t} \quad (4)$$

Per i_{max} tendente all'infinito, l'inviluppo (4) tende all'asintoto $Qm_{max}/Ma_{tot} = 1/\Delta t$, che nel caso in esame, avendo adottato $\Delta t = 5$ minuti, è pari a 12 ore^{-1} . I punti al di sotto della curva inviluppo sono quelli corrispondenti a eventi nei quali la Qm_{max} è stata provocata o dalla i_{max} verificatasi però in un Δt successivo a quello iniziale o da una $i(t)$ antecedente la i_{max} e tale da dare il massimo valore della funzione $Ma(t) \cdot (1 - e^{-Arra \cdot i(t)^{wash} \cdot \Delta t})$ durante l'evento.

Si può osservare che, mentre il verificarsi della massima intensità dell'evento i_{max} nel primo Δt conduce senz'altro al massimo del rapporto Qm_{max}/Ma_{tot} , ciò non avviene necessariamente per il rapporto C_{max}/Ma_{tot} . Infatti, tenendo presente che la concentrazione $C(t)$ è data da $Qm(t)/(i(t) \cdot S)$, ove S è l'area del bacino, la concentrazione massima C_{max} si verifica quando è massimo il prodotto delle due funzioni $Ma(t)$ e $(1 - e^{-Arra \cdot i(t)^{wash} \cdot \Delta t})/(i(t) \cdot S \cdot \Delta t)$; la prima di tali due funzioni, come osservato poc'anzi, è massima all'inizio dell'evento, mentre la seconda è massima per un valore i_c dell'intensità di pioggia tale che:

$$e^{-Arra \cdot i_c^{wash} \cdot \Delta t} \cdot (wash \cdot Arra \cdot i_c^{wash} \cdot \Delta t + 1) - 1 = 0 \quad (5)$$

dovendo essere strettamente $i_c > 0$ poiché la soluzione banale $i_c = 0$ non ha senso dal punto di vista fisico.

Per altra via, dividendo ambo i membri della (2) per $i_A(t) \cdot S$ (ovvero per $i(t) \cdot S$ qualora la pioggia fosse espressa in mm/ora anziché in pollici/ora), si ottiene la concentrazione:

$$C(t) = Ma(t) \cdot Arra \cdot i(t)^{wash-1} / S \quad (6)$$

Da tale espressione si vede che, dato un certo $Ma(t)$, la concentrazione $C(t)$ risulta decrescente o crescente al crescere dell'intensità di pioggia a seconda che sia rispettivamente $0 < wash < 1$ oppure $wash > 1$, mentre per $wash = 1$ (come in sostanza avveniva nella versione originaria del modello SWMM) non varia al variare dell'intensità di pioggia. In termini fisici, gli intervalli $0 < wash < 1$ e $wash > 1$ corrispondono a situazioni nelle quali la natura dell'accumulo è tale per cui, in funzione dell'intensità di pioggia in un dato istante t , per la determinazione della concentrazione $C(t)$ prevale rispettivamente l'effetto di diluizione su quello di dilavamento o viceversa, mentre $wash = 1$ corrisponde al caso particolarissimo in cui tali due effetti si controbilanciano. A tale proposito, giova ricordare che il parametro $wash$ venne introdotto nelle già citate più recenti versioni del modello SWMM (Huber, 1986) proprio per consentire anche la descrizione di situazioni in cui la concentrazione non risulti, come invece accadrebbe per $wash = 1$, indipendente dall'andamento dell'intensità di pioggia e quindi sempre decrescente durante l'evento in conseguenza del progressivo diminuire di $Ma(t)$.

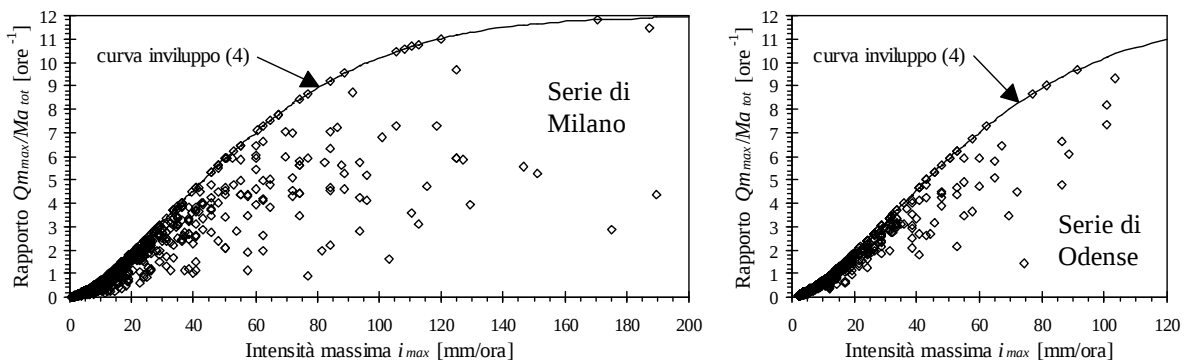


Fig. 3 – Curve inviluppo dei rapporti Qm_{max}/Ma_{tot} in funzione di i_{max} . Le simulazioni sono effettuate con accumulo rapido ($Accu = 32 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{d})$ e $Disp = 0,4 \text{ d}^{-1}$) e dilavamento lento ($Arra = 2,9 \text{ pollici}^{-wash} \cdot \text{ora}^{(wash-1)}$ e $wash = 1,5$).

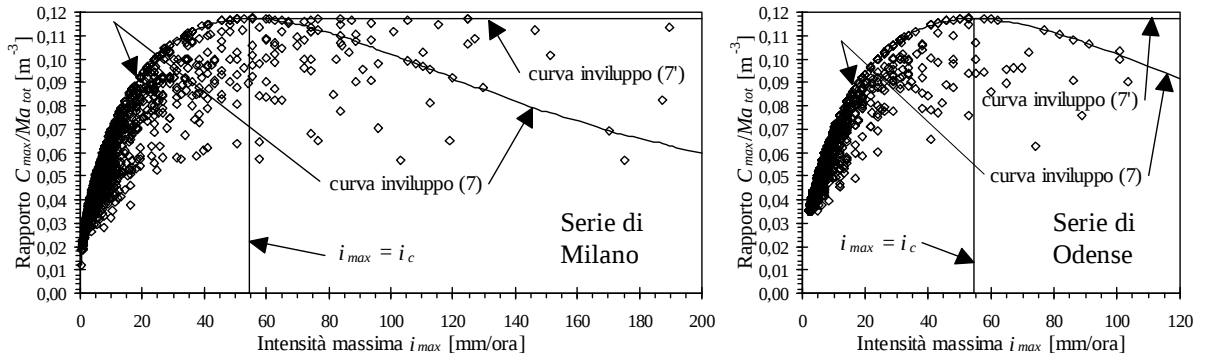


Fig. 4 – Curve inviluppo dei rapporti C_{max}/Ma_{tot} in funzione di i_{max} e di i_c . Le simulazioni sono effettuate con accumulo rapido ($Accu = 32 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{d})$ e $Disp = 0,4 \text{ d}^{-1}$) e dilavamento lento ($Arra = 2,9 \text{ pollici}^{-wash} \cdot \text{ora}^{(wash-1)}$ e $wash = 1,5$).

Soffermandosi ora sui casi in cui $wash > 1$, se l'intensità massima dell'evento i_{max} è minore dell'intensità i_c ricavabile dalla (5), allora il massimo valore del rapporto C_{max}/Ma_{tot} si verifica quando la i_{max} avviene nel primo Δt , situazione che corrisponde al ramo crescente della curva di equazione:

$$\frac{C_{max}}{Ma_{tot}} = \frac{Ma_{tot} \cdot (1 - e^{-Arra \cdot (i_{max})^{wash} \cdot \Delta t})}{Ma_{tot} \cdot i_{max} \cdot S \cdot \Delta t} = \frac{(1 - e^{-Arra \cdot (i_{max})^{wash} \cdot \Delta t})}{i_{max} \cdot S \cdot \Delta t} \quad (7)$$

Se invece l'intensità massima dell'evento i_{max} è maggiore dell'intensità i_c , allora il massimo valore del rapporto C_{max}/Ma_{tot} si ha quando è la i_c ad avvenire nel primo Δt ; in tal caso risulta:

$$\frac{C_{max}}{Ma_{tot}} = \frac{Ma_{tot} \cdot (1 - e^{-Arra \cdot i_c^{wash} \cdot \Delta t})}{Ma_{tot} \cdot i_c \cdot S \cdot \Delta t} = \frac{(1 - e^{-Arra \cdot i_c^{wash} \cdot \Delta t})}{i_c \cdot S \cdot \Delta t} \quad (7')$$

In altre parole, l'incremento delle intensità i_{max} oltre il valore i_c , anche ammettendo che tali intensità si verificano all'inizio dell'evento (cioè quando $Ma(t) = Ma_{tot}$), provoca una progressiva riduzione del valore C_{max}/Ma_{tot} dato dalla (7), a causa del prevalere dell'effetto di diluizione rispetto a quello di dilavamento.

Nella Fig. 4 è riportato, insieme con i valori del rapporto C_{max}/Ma_{tot} calcolati per ogni evento, l'andamento della curva inviluppo costituita dalla (7) nel campo $0 < i_{max} \leq i_c$ e dalla (7') nel campo $i_{max} \geq i_c$. Come si può osservare, nel campo $i_{max} > i_c$ compaiono alcuni eventi per i quali il rapporto C_{max}/Ma_{tot} risulta maggiore del valore dato dal ramo decrescente della (7), avendo essi un ietogramma tale che risulti, almeno per un certo istante t^* :

$$\frac{(1 - e^{-Arra \cdot (i_{max})^{wash} \cdot \Delta t})}{i_{max} \cdot S \cdot \Delta t} < \frac{Ma(t^*) \cdot (1 - e^{-Arra \cdot i(t^*)^{wash} \cdot \Delta t})}{Ma_{tot} \cdot i(t^*) \cdot S \cdot \Delta t} < \frac{(1 - e^{-Arra \cdot i_c^{wash} \cdot \Delta t})}{i_c \cdot S \cdot \Delta t} \quad (8)$$

In un ulteriore insieme di simulazioni è stata considerata l'incidenza della pulizia stradale, applicata ad esempio a intervalli costanti di 5 o 7 giorni ammettendo una efficienza del 50% (cioè con asportazione della metà della massa accumulata presente sul bacino al momento della pulizia meccanica), riscontrando, sebbene a questo stadio della ricerca in un modo solo indicativo, che, a parità di altre condizioni, si mantengono le stesse curve inviluppo poc'anzi descritte, ma i valori dei rapporti Qm_{max}/Ma_{tot} e C_{max}/Ma_{tot} per ciascun evento risultano significativamente ridotti rispetto alle simulazioni senza pulizia stradale. Ciò suggerisce che tale tipo di provvedimento può efficacemente contrastare, in alternativa o in aggiunta alle vasche di prima pioggia, la formazione dei carichi inquinanti che altrimenti verrebbero recapitati dagli scaricatori di piena nei corpi idrici ricettori in occasione degli eventi meteorici.

8. Individuazione di eventi critici

Un evento può essere classificato come critico dal punto di vista della qualità delle acque entranti in caditoia se determina o una massa dilavata Md_{tot} superiore a una prefissata percentuale del valore massimo possibile, il quale tende asintoticamente alla massa di saturazione del bacino $Accu/Disp$, o una massima portata in massa di inquinante Qm_{max} superiore a una percentuale analogamente prefissata del valore limite $Ma_{tot} \cdot (1 - e^{-Arra \cdot i_{max}^{wash} \cdot \Delta t})/\Delta t$. Infatti, pur senza voler qui entrare nel merito dei vari e complessi fenomeni che, avvenendo nella rete di drenaggio, conducono al pollutogramma nella sezione

di recapito, per molti aspetti sono proprio la massa dilavata e la massima portata in massa di inquinante, piuttosto che la concentrazione, i parametri di maggiore interesse dal punto di vista dell'impatto sul corpo idrico ricevente, costituendo a sua volta motivo di maggior interesse il primo per i laghi e il mare e il secondo per i corsi d'acqua.

Dall'analisi dei risultati prima presentati si evince come dal punto di vista della qualità delle acque, soprattutto qualora la pulizia stradale sia assente o scarsa, possano essere critici eventi meteorici del tutto ordinari, cioè con tempo di ritorno di pochi mesi o addirittura di poche settimane. Ciò è dovuto sia al fatto che usualmente bastano piogge con intensità di soli 5÷10 mm/ora per provocare in 15÷30 minuti, a seconda dei valori dei parametri che caratterizzano il dilavamento (Fig. 2), l'asportazione di una parte rilevante della massa accumulata sul bacino Ma_{tot} , sia al fatto che tale massa accumulata raggiunge valori vicini a quello massimo di saturazione $Accu/Disp$ già dopo un periodo di tempo secco reale relativamente modesto, variante da un minimo di 5÷10 giorni per accumulo di tipo rapido e 20÷30 giorni per accumulo di tipo lento, anche senza tenere conto della massa residua Ma_r rimasta al termine dell'evento precedente.

Tali eventi critici possono avere peculiarità molto diverse l'uno dall'altro, rendendo quindi difficile la definizione di criteri per la loro individuazione a priori sulla base delle sole caratteristiche pluviometriche.

Tuttavia, affinché un evento sia critico dal punto di vista sia della massa totale dilavata Md_{tot} che della massima portata in massa Qm_{max} , da questo studio si possono individuare tre condizioni che devono essere contemporaneamente soddisfatte e che sono le seguenti.

La prima è che il tempo secco reale t_{sr} antecedente all'evento sia maggiore o uguale a un tempo tale che, anche senza una significativa massa residua alla fine dell'evento precedente, il bacino si trovi comunque in una situazione in cui in pratica Ma_{tot} sia pari a una prefissata frazione y del rapporto di saturazione $Accu/Disp$.

La seconda è che la i_{max} avvenga nel primo Δt dell'evento, cosicché determini sicuramente una Qm_{max} tale per cui il corrispondente rapporto Qm_{max}/Ma_{tot} appartenga senz'altro all'involuppo (4).

La terza è che l'ordinata di tale involucro, la quale dipende, oltre che da i_{max} , anche da $Arra$ e $wash$, sia abbastanza grande da far sì che il prodotto $\Delta t \cdot Qm_{max}$, ovvero la massa dilavata già nel primo Δt dell'evento, costituisca una percentuale significativamente elevata della Ma_{tot} massima possibile, cioè sostanzialmente, qualora sia soddisfatta anche la prima condizione, del rapporto $Accu/Disp$ o della prescelta frazione y del rapporto medesimo. Una volta prefissata tale percentuale, nel seguito indicata come x , si ottiene la disequazione:

$$\Delta t \cdot Qm_{max} \geq x \cdot Ma_{tot} \cong x \cdot y \cdot Accu/Disp \quad (9)$$

da cui, ricordando la (4), si ha:

$$(1 - e^{-Arra \cdot i(t)^{wash} \cdot \Delta t}) \geq x \cdot y \quad (10)$$

Dunque, prescelti il valore di x e di y oltre i quali un evento è ritenuto critico e il Δt di calcolo, l'evento di volta in volta considerato è sicuramente critico se la sua i_{max} avviene nel primo Δt superando il valore di soglia fornito dalla (10). Si noti che nella (10) incidono fortemente i parametri del modello di dilavamento mentre il parametro $Disp$ del modello di accumulo influisce sul tempo di saturazione del bacino e quindi sul numero di eventi che soddisfano alla prima delle sottocondizioni sopra elencate.

La Tab. 4 riporta un esempio di eventi a intensità costante che sono critici per una soglia di criticità caratterizzata rispettivamente da $y = 0,90$ e $x = 75\%, 65\%, 55\%$ e 45% , cioè che hanno valori di intensità massima limite oltre i quali, se la massa accumulata iniziale è pari a una frazione y di quella di saturazione $Accu/Disp$ e se tale intensità massima avviene nel primo intervallo di discretizzazione temporale assunto pari a 5 minuti, si ottiene contemporaneamente una massa dilavata pari a una percentuale $x \cdot y$ di $Accu/Disp$ e una portata massima in massa pari, similmente, a una percentuale $x \cdot y$ di $(Accu/Disp)/\Delta t$. Pertanto ietogrammi rettangolari di durata pari a soli 5 minuti e di intensità almeno pari ai valori tabellati risultano sicuramente critici solo se abbinati a una durata del tempo secco che li precede superiore al tempo di saturazione. Tali intensità di pioggia sono abbastanza ordinarie, come si può desumere ad esempio per confronto con le curve di possibilità pluviometrica di Milano per durate pari a 5 minuti (Piga et al., 1990), con frequenza di alcune volte all'anno. Tuttavia la combinazione delle due dette caratteristiche, cioè sia intensità di pioggia che tempo secco superiori a prefissati valori di soglia, conduce a una frequenza ben più ridotta degli ietogrammi critici. Ad esempio, a partire dalla Tab. 4 si possono individuare, considerando un tempo secco reale $t_{sr} \geq 9,6$ giorni che discende, attraverso la (1), dall'aver scelto $y = 0,90$ e $Disp = 0,24 \text{ d}^{-1}$ (quest'ultimo cioè intermedio fra gli estremi di letteratura $0,08 \text{ d}^{-1}$ e $0,40 \text{ d}^{-1}$), solo 7 eventi sicuramente critici nella serie di Milano e solo 1 in quella

di Odense; le caratteristiche principali di tali eventi sono riportate in Tab. 5. D'altra parte, essendo la condizione di tipo sufficiente ma non anche necessario, in generale oltre a tali eventi ne esistono nella serie considerata anche altri che si rivelano essere critici e che quindi provocano effetti simili a quelli degli eventi qui individuati.

Riassumendo, si può dunque affermare che un evento può essere considerato sicuramente critico sia dal punto di vista del carico globale Md_{tot} che per la massima portata in massa Qm_{max} se da esso vengono contemporaneamente soddisfatte le seguenti tre condizioni:

- 1) tempo secco reale maggiore o uguale del tempo di saturazione del bacino ovvero, in pratica, presenza sul bacino, all'inizio dell'evento, di una percentuale prefissata della massa di saturazione $Accu/Disp$;
- 2) ietogramma con intensità massima in corrispondenza del primo passo temporale Δt ;
- 3) intensità massima (nel primo passo temporale Δt) almeno pari ai valori forniti dalla (10).

<i>Arra</i> [pollici ^{-wash} · ora ^(wash-1)]	i_{max} limite [mm/ora]			i_{max} limite [mm/ora]		
	$x = 75\%$			$x = 65\%$		
	$wash = 1,5$	$wash = 1,75$	$wash = 2$	$wash = 1,5$	$wash = 1,75$	$wash = 2$
2,9	70,8	61,1	54,8	60,1	53,1	48,5
6,1	43,1	40,0	37,8	36,6	34,7	33,4
9,3	32,5	31,4	30,6	27,6	27,3	27,1

<i>Arra</i> [pollici ^{-wash} · ora ^(wash-1)]	i_{max} limite [mm/ora]			i_{max} limite [mm/ora]		
	$x = 55\%$			$x = 45\%$		
	$wash = 1,5$	$wash = 1,75$	$wash = 2$	$wash = 1,5$	$wash = 1,75$	$wash = 2$
2,9	50,8	46,0	42,7	42,3	39,3	37,2
6,1	30,9	30,1	29,4	25,8	25,7	25,7
9,3	23,4	23,6	23,8	19,4	20,2	20,8

Tab. 4 – Valori di i_{max} limite [mm/ora], in funzione di *Arra* e *wash*, oltre i quali un evento che presenti tempo secco reale maggiore del tempo di saturazione del bacino e i_{max} nel primo intervallo di discretizzazione temporale dell'evento possa essere considerato critico per soglie di criticità della massa accumulata pari a $0,90 \cdot Accu/Disp$ (ovvero $y = 0,90$).

Serie di	Milano - via Monviso							Odense (Danimarca)
Evento	1	2	3	4	5	6	7	1
i_{max} [mm/ora]	88,8	55,2	55,2	105,6	62,4	76,8	112,8	52,8
i_m [mm/ora]	8,3	6,4	4,9	33,6	24,9	8,9	16,9	13,4
t_{picco} [min]	0÷5	0÷5	0÷5	0÷5	0÷5	0÷5	0÷5	0÷5
ϑ [min]	180	75	105	25	25	165	190	25
Vd [m ³]	25,0	8,0	8,6	14,0	10,4	17,8	10,0	5,6
t_{sr} [d]	9,9	14,8	12,9	13,8	10,6	10,5	12,2	25,2

Tab. 5 – I 7 eventi della serie pluviometrica storica di Milano - via Monviso e l'evento di quella di Odense (Danimarca) che soddisfano una condizione sufficiente di criticità con ad esempio $y = 0,90$ e $x = 55\%$ in base ai valori di Tab. 4, considerando $Disp = 0,24 \text{ d}^{-1}$ (ovvero un tempo secco reale $t_{sr} \geq 9,6$ giorni), $Arra = 2,9 \text{ pollici}^{-wash} \cdot \text{ora}^{(wash-1)}$ e $wash = 1,5$.

È da sottolineare che, come già detto poc'anzi, in effetti avviene un numero ben maggiore di eventi che risultano essere critici per l'uno o per l'altro aspetto. Pertanto l'evento critico sintetico prima definito non è affatto in grado di rappresentare l'interesse del processo stocastico degli eventi critici, la cui analisi rimane ancora oggetto di studio, ma la sua utilità risiede nel fatto che, essendo sicuramente critico per tutti gli aspetti prima esposti ed essendo definibile a priori solo in base al parametro $Accu/Disp$ e alla condizione (10), consente di riscontrare l'entità dei massimi carichi inquinanti e l'efficacia di interventi impiantistici o gestionali atti al suo controllo.

Cionondimeno, si pongono alcune riflessioni sulla significatività di tali eventi critici per questo tipo di analisi; infatti, se è pur vero che le indicazioni fin qui emerse mostrano, a partire da quanto riportato

in Tab. 4, che anche vasche di prima pioggia aventi capacità di soli 5÷6 mm basterebbero ad accogliere una percentuale molto rilevante dei carichi inquinanti associati alle acque di prima pioggia, è altrettanto vero che solo la simulazione di una lunga serie storica reale, oppure generata stocasticamente, permette una corretta valutazione degli effetti provocati da eventi meteorici in cui le maggiori intensità di pioggia avvengano successivamente alle fasi iniziali, provocando quindi l'arrivo di rilevanti flussi inquinanti alle vasche di prima pioggia quando ormai queste sono già state riempite in tutto o in parte. Inoltre, di conseguenza, resta ancora da valutare la distribuzione di probabilità, ovvero il tempo di ritorno, con cui si manifestano determinati carichi inquinanti, in termini sia di massima portata in massa, sia di massa dilavata, sia di massima concentrazione.

Bibliografia

- AA.VV. (1997), *Sistemi di fognatura. Manuale di progettazione*, Ed. Centro Studi Deflussi Urbani - Hoepli, Milano, pp. 308-335.
- Alley W.M. (1981), "Estimation of impervious area washoff parameters", *Water Resources Research*, vol. 17, n. 4.
- Alley W.M., Smith P.E. (1981), "Estimation of accumulation parameters for urban runoff quality modelling", *Water Resources Research*, vol. 17, n. 6.
- Artina S., Bardasi G., Borea F., Franco C., Maglionico M., Paoletti A., Sanfilippo U. (2000), "Modellazione della qualità delle acque in corpi idrici superficiali durante eventi di pioggia. Lo studio pilota di Bologna", *Atti delle Giornate di Studio "Risorse idriche ed impatto ambientale dei deflussi urbani"*, Cagliari, 18-20 novembre 1998, Ed. Centro Studi Deflussi Urbani, Milano.
- Artina S., Bardasi G., Borea F., Franco C., Maglionico M., Paoletti A., Sanfilippo U. (2000), "Water quality modelling in ephemeral streams receiving urban flows", *Proceedings of the IMUG2000 Conference, Praga, Rep. Ceca, 12-14 aprile 2000*.
- Artina S., Maglionico M., Marinelli A. (1998), "Le misure di qualità nel bacino urbano Fossolo", *Atti del seminario sui deflussi urbani di S. Cassiano, 28-31 marzo 1995*, Centro Studi Deflussi Urbani, Milano.
- Begnig R. (2000), *Influenze delle caratteristiche del processo piovoso sulla dinamica degli inquinanti sulla superficie dei bacini urbani*, Tesi di laurea, Politecnico di Milano.
- Bujon G. (1988), "Prevision des débits et des flux polluants transités par les réseaux d'égouts par temps de pluie. Le modele FLUPOL", *La Houille Blanche*, n. 1.
- Bujon G., Herremans L. (1990), "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.
- Huber W.C. (1986), *Deterministic modeling of urban runoff quality*, NATO ASI Series, Vol. G10, Urban Runoff Pollution, Edited by Torno H.C., Marsalek J., Desbordes M., Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Huber W.C., Dickinson R.E. (1988), *Storm Water Management Model: User's Manual*, U.S. EPA/600/3-88/001a, EPA, Athens, Georgia.
- Maglionico M. (1998), *Indagine sperimentale e simulazione numerica degli aspetti qualitativi dei deflussi nelle reti di drenaggio urbano*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica, Università di Bologna.
- Maglionico M., Zappi I. (1998), "Proposta di un metodo per il dimensionamento delle vasche di accumulo per il controllo qualitativo delle reti di drenaggio", *Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Catania, 9-12 settembre 1998*, vol. IV, pp. 191-202.
- Metcalf & Eddy Inc., University of Florida, Water Resources Engineers Inc. (1971), *Storm Water Management Model*, 4 vols, U.S. EPA 11024 DOC 07/71, Washington D.C.
- Nakamura E. (1984), "Factors affecting stormwater quality decay coefficient", *Proceedings of the Third ICUSD*, vol. 3, Goteborg, Svezia, pp. 979-988.
- Novotny V., Bannerman R., Baum K. (1985), "Estimating nonpoint pollution from small urban watersheds", *Journal of Water Pollution Control Federation*, vol. 57, n. 4, Washington D.C.
- Novotny V., Goodrich-Mahoney J. (1978), "Comparative assessment of pollution loadings from non point sources in urban land use", *Prog. Water Tech.*, n. 10.
- Piga E., Salis M., Passoni G. (1990), *Analisi statistica delle piogge intense di breve e brevissima durata nell'area metropolitana di Milano*, ed. Città Studi, Milano, 1990.
- Sartor J.D., Boyd G.B., Agardy F.J. (1974), "Water pollution aspects of street surface contaminants", *Journal of Water Pollution Control Federation*, vol. 46, n. 3, Washington D.C.
- Sueishi T., Morioka T., Kawamoto S. (1984), "Comparison among models for stormwater and pollutant runoff in view of their reliability, sensitivity and applicability", *Proceedings of the Third ICUSD*, vol. 2, Goteborg, Svezia, pp. 605-614.