

TARATURA DI UN MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI SU BACINI SPERIMENTALI URBANI ITALIANI

Stefano Pagliara*

Sommario

Obiettivo della presente ricerca e' quello di calibrare e verificare un modello di trasformazione afflussi-deflussi su alcuni bacini urbani sperimentali italiani. Il modello considerato utilizza, per la trasformazione in pioggia netta, la metodologia "Curve Number" in cui è introdotta la possibilità di considerare una percentuale di area priva di perdite iniziali e, per la trasformazione afflussi-deflussi, lo schema dell'onda cinematica. La calibrazione dei parametri viene effettuata per mezzo di un codice di calcolo che implementa l'algoritmo di Gauss-Mardquard-Levenberg per la minimizzazione di una opportuna funzione obiettivo.

Palabras clave: Afflussi-deflussi, calibrazione di modelo, bacini urbani sperimentali.

Introduzione

In Italia, da ormai più di un decennio, è in atto un programma di ricerca sui deflussi urbani che ha permesso di attrezzare 9 bacini. La notevole quantità di dati sperimentali acquisita in questi anni, insieme a quella già presente a livello internazionale, ha permesso di compiere notevoli progressi nella conoscenza di un fenomeno, quale quello della modellazione di reti di drenaggio, che riveste sempre maggiore importanza nelle città in cui viviamo.

Molti modelli matematici sono oggi disponibili per lo studio dei deflussi urbani; dai più semplici modelli "globali" che simulano i processi idrologici mediante un unico operatore il quale rappresenta il comportamento medio del bacino, ai più sofisticati modelli "fisicamente basati" che utilizzano un approccio di tipo distribuito tenendo

quindi conto della variazione spaziale delle caratteristiche del bacino.

Un aspetto importante di tali modelli è la presenza di idonee *routines* per la ottimizzazione dei parametri. L'ottimizzazione automatica è infatti estremamente utile per modelli che, come quelli attuali, sono spesso caratterizzati da un buon numero di parametri i quali, seppur con un apparentemente evidente significato fisico, assumono frequentemente valori di taratura.

Per il presente studio sono stati scelti 5 bacini fra quelli attivi in Italia. Le caratteristiche principali dei bacini utilizzati sono riportate in Tab. 1, mentre per un maggior dettaglio si rimanda ai lavori originali (Calomino e Paoletti 1994, Pagliara 1996).

Tabella 1: Caratteristiche principali dei bacini studiati.

Bacino	C.I.	A _t (ha)	n _{sb}	A _{imp} (%)	i _{bm} (%)	i _{cm} (%)	L _{tot} (m)	φ _m	n.e.
Luzzi (CS)	IT01	1.89	15	91	17	15.8	384	0.66	10
Parco D'Orl. (PA)	IT02	14.29	39	70	0.95	1.7	3500	0.24	9
Malvaccaro (PZ)	IT03	8.10	24	85	7	5.6	670	0.45	8
Cascina S. (PV)	IT04	11.35	46	65	0.1	0.42	2045	0.37	11
Fossolo (BO)	IT06	40.71	47	75	0.3	0.3	5300	0.24	5

* Dipartimento di Ingegneria Civile. Via Gabba 22. 56126 Pisa, Italia. Telf: +39 050 550376 Fax: +39 050 830206 e-mail: s.pagliara@ing.unipi.it
Artículo recibido el 22 de julio de 1997, recibido en formas revisadas el 8 de febrero de 1999 y el 22 de octubre de 1999 y aceptado para su publicación el 5 de noviembre de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

In Tab. 1 si ha $C.I.$ = codice di identificazione internazionale del bacino; A_t = area totale del bacino; n_{sb} = numero di sottobacini; A_{imp} = percentuale di area impermeabile rispetto all'area totale; i_{bm} = pendenza media dei sottobacini; i_{cm} = pendenza media dei collettori; L_{tot} = lunghezza totale dei collettori; ϕ_m = coefficiente di afflusso medio relativamente agli eventi considerati; n.e. = numero di eventi utilizzati.

Gli eventi usati per le simulazioni sono stati oggetto, in varie fasi (Calomino, Maksimovic e Molino 1995), di validazione e risultano acquisiti con passi temporali molto brevi; infatti il campionamento è effettuato con passi minori o uguali al minuto primo per quanto riguarda le piogge e minori o uguali a due minuti primi per quanto riguarda la misura dei livelli.

Descrizione del modello afflussi-deflussi

Un problema fondamentale in idrologia è quello della scelta del modello di pioggia netta anche se, la complessità del comportamento della parte superficiale di terreno nonché la mancanza di misurazioni dirette dei processi di perdita, fanno sì che i modelli usati risultino spesso di tipo empirico; nel presente studio, come detto, è stata usata la metodologia sviluppata dal Soil Conservation Service Statunitense (S.C.S., 1972) del "Curve Number". Tale metodo risulta molto usato nella pratica progettuale ed è stato oggetto di numerosi approfondimenti (Aron e Al. 1977, Hjelmfelt 1981, Chen 1982, Hawkins e Al. 1985, Hawkins 1993).

Nel presente lavoro è stata considerata una certa percentuale di area contribuente al deflusso senza alcuna perdita per infiltrazione o per riempimento delle depressioni superficiali; ciò ha portato all'introduzione, come di seguito descritto, di un valore di CN modificato e denominato CN_{eq} che tenga conto della presenza di un tale tipo di area almeno in termini globali per quanto riguarda il valore del coefficiente di afflusso globale dell'evento considerato. Il coefficiente di afflusso globale, per un dato evento, viene definito come il rapporto fra la pioggia defluita attraverso la sezione finale del bacino e la pioggia totale caduta.

Bisogna premettere che, in tutti i casi considerati, la parte permeabile del bacino è risultata non contribuente al deflusso anche nel caso degli eventi meteorici più intensi; ciò è evidenziato dai valori assunti dal coefficiente d'afflusso delle aree impermeabili (imp (rapporto fra la pioggia che de-

fluisce attraverso la sezione finale e la pioggia caduta sulle sole aree impermeabili direttamente connesse alla rete) che è sempre risultato sensibilmente inferiore al rapporto fra le aree impermeabili connesse alla rete drenante e l'area totale. Tale rapporto, al crescere dell'importanza dell'evento, dovrebbe tendere a uno e addirittura ad un valore superiore all'unità qualora le aree permeabili fornissero un contributo in termini di deflusso.

Le relazioni fondamentali del metodo classico sono:

$$Pe = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{per } P > I_a \quad (1)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Introducendo le espressioni:

$$Pe_{eff} = Pe \cdot \left(1 - \frac{AI\%}{100}\right) + \frac{P \cdot AI\%}{100} \quad (3)$$

$$I_{a_{eq}} = I_a \cdot \frac{100 - AI\%}{100} \quad (4)$$

le quali tengono conto della presenza del parametro $AI\%$ e risolvendo in funzione del "Curve Number" si ottiene la relazione:

$$CN_{eq} = \frac{-25400 \cdot Pe_{eff}}{Pe_{eff} \cdot (P - I_{a_{eq}} - 254) - (P - I_{a_{eq}})^2} \quad (5)$$

Nelle precedenti equazioni, S (mm) è il volume massimo immagazzinabile nel terreno a saturazione ed è funzione del CN che rappresenta il "Curve Number" usato per la simulazione di un particolare evento, I_a (mm) = "Initial abstraction" è la perdita iniziale, P è la pioggia totale che caratterizza l'evento, Pe rappresenta la pioggia netta, $AI\%$ è la percentuale della parte impermeabile del bacino che contribuisce al deflusso senza perdite, $I_{a_{eq}}$ è la perdita iniziale media sul bacino considerando anche la presenza dell'area $AI\%$, Pe_{eff} è la pioggia netta globale considerando anche l'area $AI\%$.

Il parametro CN_{eq} fa sì che la depurazione della pioggia ottenuta con il metodo CN in presenza dell'area $AI\%$ sia equivalente, nei termini del solo coefficiente di afflusso globale, a quella che si otterrebbe applicando il metodo CN in assenza dell'area impermeabile suddetta.

Per quanto riguarda la trasformazione degli afflussi netti in deflussi è stato scelto il metodo dell'onda cinematica che consente, ove applicabile, una accettabile situazione di compromesso fra la precisione del calcolo e la pesantezza della elaborazione numerica. L'onda cinematica inoltre ben si adatta ai bacini urbani e per la loro limitata estensione e per la loro naturale propensione verso una schematizzazione a falde.

Fra i modelli che utilizzano tale schema (tra cui ricordiamo i ben noti modelli SWMM-TRANSPORT, DR3M, CTH e MOUSE) è stato scelto il software HEC-1, per la sua diffusione e per le sue caratteristiche. Lo schema di calcolo in esso implementato prevede la soluzione delle equazioni di continuità e del moto per mezzo di uno schema alle differenze finite di tipo esplicito; le equazioni usate sono:

- l'equazione di continuità

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_0 \quad (6)$$

in cui: Ω = sezione liquida; Q = portata liquida; q_0 = portata laterale,

- l'equazione del moto rappresentata dalla equazione di Manning scritta nella forma:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \Omega \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (7)$$

in cui R è il raggio idraulico, i la pendenza del condotto ed n il coefficiente di scabrezza. Lo schema dell'onda cinematica sopra descritto è applicato sia al moto su falda che in rete.

Nell'applicazione del modello ciascun bacino è stato suddiviso in un numero di sottobacini variabile da 15 a 47 in modo da avere un grado di dettaglio a livello del singolo pozzetto della rete di fog-natura.

Ciascun sottobacino era diviso in due in modo da simulare la parte impermeabile (tetti, strade, superfici pavimentate) e la parte permeabile dello stesso; una percentuale $AI_1\%$ della parte impermeabile veniva inoltre ipotizzata senza la presenza di alcun fenomeno di perdita e quindi immediatamente contribuente. Ciascuna parte di ogni sottobacino era inoltre caratterizzata da una lunghezza di falda, una pendenza della stessa ed un valore del coefficiente di scabrezza.

Fase di calibrazione

La calibrazione rappresenta una fase importante nell'applicazione di un modello matematico e consiste nel trovare il set di parametri che dia luogo, in base ad un prefissato criterio, alla migliore ricostruzione degli eventi di piena registrati.

Un modello può essere calibrato manualmente solo in presenza di un limitatissimo numero di parametri, al crescere dei quali l'operazione diviene inopportuna principalmente a causa del fatto che la logica secondo la quale i parametri variano è difficile da determinare soprattutto a causa degli effetti di compenso che i parametri stessi hanno sui risultati del modello.

Nel caso del modello usato nella presente ricerca i parametri possono essere suddivisi in tradizionali e non-tradizionali (Ibrahim e Al., 1992);

parametri tradizionali

per il modello di pioggia net ta:

- Ia_1, Ia_2 = perdita iniziale rispettivamente nella parte permeabile ed impermeabile di ogni sottobacino;
- CN_1, CN_2 = "Curve Number" relativi alla parte permeabile ed impermeabile di ogni sottobacino;
- $AI_1\%$ = percentuale di area che non presenta perdite relativamente alla parte impermeabile di ciascun sottobacino;

per il modello pioggia netta-deflussi:

- n_1, n_2 = coefficiente di scabrezza di Manning per la parte impermeabile e permeabile della falda caratterizzante ciascun sottobacino;
- n_c = coefficiente di scabrezza per i collettori;

parametri non-tradizionali

- L_1, L_2 = lunghezza della falda della parte impermeabile e permeabile di ciascun sottobacino;
- s_1, s_2 = pendenza della falda della parte impermeabile e permeabile di ciascun sottobacino;
- A_{imp} = area impermeabile direttamente connessa alla rete drenante.

Per cui in totale si hanno 13 parametri; fra questi, i parametri non-tradizionali sono stati oggetto di misurazione per i vari bacini considerati, quindi sono stati assunti noti ed esclusi dalla ottimizzazione; la valutazione dei coefficienti d'afflusso dei vari bacini considerati porta inoltre alla conclusione che, come già detto, le parti permeabili

li degli stessi non contribuiscano al deflusso anche nel caso di eventi di una certa entità; sono stati quindi esclusi tutti quei parametri legati alla parte permeabile dei vari sottobacini (Ia_2, CN_2, n_2). Infine è stato assunto noto il coefficiente di scabrezza di Manning n_c dei collettori principali.

I parametri oggetto di ottimizzazione si riducono quindi a 4 e precisamente: $Ia_1, CN_1, AI_1\%, n_1$ ¹.

La procedura di ottimizzazione

Per la calibrazione dei parametri è stato usato il package *PEST* (Parameter *EST*imation, Doherty et Al. 1994). Il modello usa la tecnica nonlineare di stima conosciuta in letteratura come algoritmo di Gauss-Marquardt-Levenberg.

Il processo di ottimizzazione è iterativo: all'inizio di ogni iterazione viene linearizzata la relazione fra i parametri del modello e le osservazioni generate dallo stesso, quindi vengono calcolate, con metodi alle differenze finite, le derivate delle osservazioni rispetto ai parametri. Il problema così linearizzato è risolto per il set di parametri e tali nuovi parametri vengono testati facendo girare nuovamente il modello. Dal confronto fra le variazioni dei parametri e quelle della Funzione Obiettivo (F.O.) il modello decide se effettuare una nuova iterazione o se il set di parametri trovato sia quello ottimale.

Poichè si tratta di un problema in cui esistono anche valori di minimo relativo della F.O., risulta molto importante una oculata scelta del valore iniziale dei parametri; ciò consente di arrivare più velocemente alla soluzione.

La F.O. da minimizzare risulta:

$$\Phi = \sum_{i=1}^m (w_i (q_i^{obs} - q_i^{calc}))^2 \quad (8)$$

in cui q_i^{obs} valore dell'idrogramma di piena osservato al tempo i , q_i^{calc} valore calcolato dell'idrogramma di piena nello stesso istante ed w_i è il peso con cui tale osservazione contribuisce al calcolo della F.O.

La sommatoria è stata estesa, per tutti gli eventi analizzati, a tutti i valori dell'idrogramma di piena discretizzato ad intervalli di 1 o 2 minuti primi. Ovunque i pesi w_i sono stati posti pari all'unità

tranne che nei tratti in corrispondenza della portata di picco in cui sono stati assunti valori variabili da 4 a 6, a seconda degli eventi considerati; ciò per conferire maggiore importanza alle osservazioni relative alla parte più alta dell'onda di piena. Il processo di ottimizzazione ha richiesto tempi di calcolo abbastanza lunghi (in media ogni tentativo di ottimizzazione ha richiamato il modello un centinaio di volte e, spesso, si sono ottenuti valori della F.O. di minimo relativo). In totale sono stati usati per la fase di calibrazione 26 eventi relativamente ai 5 bacini usati. Nella Fig.1 sono riportati alcuni degli eventi calibrati; gli ietogrammi di pioggia riportano in ordinata i millimetri di pioggia caduti in un minuto primo (eccetto per il bacino di Parco d'Orleans per cui la pioggia h è riferita ad un intervallo di tempo di due minuti primi); nella figura è riportato a tratto continuo l'idrogramma misurato. In Tab. II sono riportati in sintesi i risultati ottenuti. Tale tabella riporta nell'ordine il codice identificativo dell'evento, la data, il valore del CN_1 ed il valore della perdita iniziale Ia_1 ottenuti nella fase di calibrazione, l'altezza di pioggia totale P , la percentuale $AI_1\%$ di area senza perdite, il coefficiente n_1 di scabrezza, i parametri Pe, Pe_{eff}, CN_{1eq} ed Ia_{1eq} sopra definiti, il coefficiente di afflusso relativo alla sola parte impermeabile del bacino ϕ_{imp} ed infine il coefficiente di afflusso globale relativo a tutto il bacino ϕ .

La fase di ottimizzazione ha permesso di valutare i limiti di confidenza al 95% dei parametri osservati i quali, sono riportati in Tab. 3 come media dei valori ottenuti per i diversi eventi ottimizzati per ciascun bacino. Tali limiti risultano utili per una valutazione di sensibilità dei valori dei parametri ottenuti.

Le matrici dei coefficienti di correlazione (in cui il generico termine r_{ij} riporta il grado di legame lineare esistente tra i due parametri i e j) non presentano, se non occasionalmente, valori elevati (vicini ad 1) dei termini non diagonali, da cui discende che i parametri utilizzati non risultano correlati fra loro in maniera significativa e quindi la loro stima risulta affidabile.

1. A rigore per ogni bacino si hanno tanti valori di n_1 per quanti sono i sottobacini schematizzati; nella presente ricerca è stata fatta l'ipotesi che tale parametro fosse lo stesso per tutti i sottobacini relativamente ad ogni bacino schematizzato.

Tabella 2: Caratteristiche principali degli eventi usati per la calibrazione

Evento	Data	CN _i	la _i (mm)	P (mm)	AI _i %	n _i	Pe (mm)	Pe eff. (mm)	Cn _i eq.	la _i eq. (mm)	φ _{imp}	φ
IT0108	14/09/88	99.0	0.1	8.6	15.0	0.045	6.53	6.84	99.19	0.09	0.80	0.72
IT0119	22/11/88	99.8	0.1	3.5	16.0	0.040	2.96	3.04	99.84	0.08	0.87	0.79
IT0148	14/04/89	99.9	0.2	5.2	18.0	0.040	4.76	4.84	99.92	0.16	0.93	0.85
IT0156	18/05/89	98.4	0.1	22.6	5.0	0.035	19.01	19.19	98.49	0.10	0.85	0.77
IT0162	30/03/90	99.9	0.2	3.2	6.0	0.040	2.77	2.79	99.91	0.19	0.87	0.79
IT0202	29/09/87	91.5	0.2	5.3	24.7	0.023	0.91	0.99	96.89	0.15	0.38	0.26
IT0216	16/11/87	70.5	1.2	27.5	30.0	0.022	5.22	11.90	88.48	0.84	0.43	0.30
IT0241	09/01/88	98.9	1.2	5.6	20.6	0.022	2.68	3.28	99.24	0.95	0.59	0.41
IT2176A	05/11/93	89.0	1.3	8.6	18.6	0.018	0.38	2.72	95.00	1.06	0.32	0.22
IT2218	05/02/94	78.1	0.1	7.6	52.3	0.018	0.71	4.31	97.82	0.05	0.57	0.40
IT2223	08/02/94	74.0	0.9	9.0	33.7	0.017	0.68	3.49	95.49	0.56	0.39	0.27
IT0302	04/03/99	72.0	0.3	10.0	48.0	0.040	0.88	5.26	96.70	0.13	0.53	0.45
IT0306	26/07/89	62.0	0.8	23.8	52.0	0.070	2.96	18.80	93.96	0.38	0.58	0.49
IT0310	28/09/89	76.0	0.4	8.2	45.0	0.020	0.96	4.07	97.07	0.22	0.50	0.42
IT0314	20/05/90	58.0	1.0	20.6	55.0	0.053	0.89	12.18	95.06	0.45	0.59	0.50
IT0323	30/08/91	97.2	1.0	7.2	20.0	0.060	2.84	3.72	98.21	0.80	0.52	0.44
IT0407	01/07/89	98.7	3.0	9.5	6.0	0.030	4.29	4.60	98.83	2.82	0.48	0.31
IT0410	05/08/89	99.9	2.0	6.3	5.0	0.024	4.06	4.17	99.91	1.90	0.66	0.43
IT0412	04/08/89	87.0	2.8	36.6	10.0	0.035	15.92	17.99	89.28	2.52	0.49	0.32
IT0413	27/08/89	96.2	2.5	14.2	8.0	0.035	6.30	6.93	96.75	2.30	0.49	0.32
IT0417	24/05/90	80.0	2.5	52.8	10.0	0.038	22.23	25.29	83.42	2.25	0.48	0.31
IT0423	07/09/90	98.0	1.4	15.2	10.0	0.026	10.03	10.55	98.27	1.26	0.69	0.45
IT0601	28/08/89	70.0	2.0	6.0	37.0	0.017	0.14	2.31	98.07	1.26	0.38	0.29
IT0602	28/08/89	81.0	2.0	40.4	43.0	0.017	15.05	25.95	92.65	1.14	0.64	0.48
IT0604	03/09/89	65.0	2.0	16.4	46.0	0.015	0.37	8.28	95.13	1.08	0.51	0.38
IT0608	07/10/89	79.0	2.0	5.8	35.0	0.015	0.20	2.16	98.12	1.30	0.37	0.28

Tabella 3: Limiti di confidenza al 95% dei parametri calibrati.

Bacino	la _i (mm)	CN _i	AI _i %	n _i
Luzzi (CS)	±0.1	±0.2	±3	±0.004
Parco D'Orlenas (PA)	±0.1	±2.5	±7	±0.006
Malvaccaro (PZ)	±0.1	±0.2	±2	±0.004
Cascina Scala (PV)	±0.7	±1.3	±1.5	±0.007
Fossolo (BO)	±0.4	±4	±2	±0.003

Fase di verifica ed analisi dei risultati

Terminata la fase di calibrazione si è proceduto alla verifica del modello mediante l'uso di eventi indipendenti rispetto alla prima fase del lavoro; la verifica e il processo che controlla la calibrazione del modello mediante l'uso di un set di dati indipendente.

La fase di calibrazione ha permesso di valutare il valore dei parametri la_i, AI_i% ed n_i i quali sono riportati in Tab. 4. Per la valutazione del quarto parametro è stato costruito, per ciascun bacino e relativamente agli eventi oggetto di calibrazione, il

grafico che riporta il parametro CN_{eq} in funzione dell'altezza di pioggia totale P (Fig.2). Da tale figura risulta evidente come ciascun bacino possa essere rappresentato da una curva P-CN_{eq}; nella fase di verifica, conoscendo l'altezza di pioggia dell'evento P, si ottiene quindi il corrispondente valore di CN_{eq} e quindi mediante le relazioni (1)-(4) il valore di CN_i da utilizzare per la verifica dell'evento considerato. Per cui la conoscenza della curva P-CN_{eq} per un dato bacino permette di ottenere, per ogni valore della pioggia totale P il valore del Curve Number classico, cioè del volume massimo immagazzinabile S.

Tabella 4: Valori ottimali dei parametri la_i, n_i e AI_i%. Il parametro CN_i si se ottiene mediante i grafici di Fig. 2 le eq. (1)-(4)

Bacino	la _i (mm)	n _i	AI _i %
Luzzi (CS)	0.15	0.04	12
Parco D'Orlenas (PA)	0.8	0.02	30
Malvaccaro (PZ)	1.0	0.05	44
Cascina Scala (PV)	2.3	0.03	8
Fossolo (BO)	2.0	0.016	41

L'andamento dei grafici di Fig.2 richiede una considerazione: dal loro esame si potrebbe infatti dedurre che il coefficiente di afflusso vada diminuendo all'aumentare dell'altezza totale di pioggia P in quanto, come ben noto, un minor valore del Curve Number porta ad un maggior volume di pioggia persa per infiltrazione. In realtà così non è, come dimostra il grafico di Fig.3, in cui è riportato l'andamento di CN_{eq} e di ϕ (in funzione di P per un sottobacino con valori di $CN_1=96$, $la_1=1$ mm ed $AI_1\%=25$ assegnati).

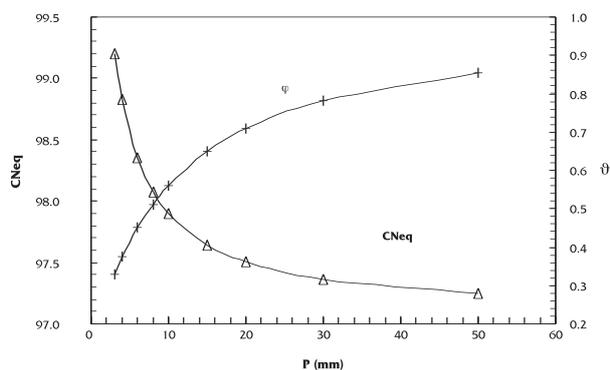


Figura 3: Andamento di CN_{eq} e di ϕ_{imp} in funzione della altezza di pioggia P per un bacino ipotetico con $CN_1=96$, $la_1=1$ mm e $AI_1\%=25\%$.

I grafici relativi ad alcuni degli eventi usati per le verifiche sono riportati in Fig. 4 mentre in Tab.5 sono riportati in sintesi i dati più significativi di tali eventi.

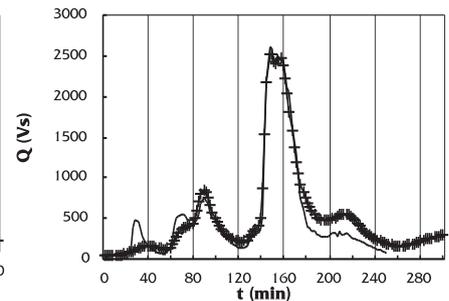
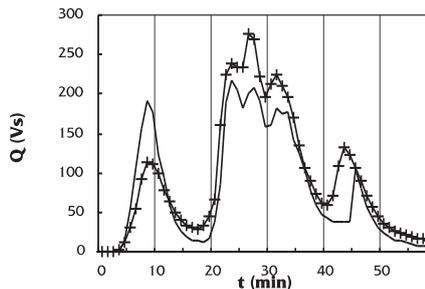
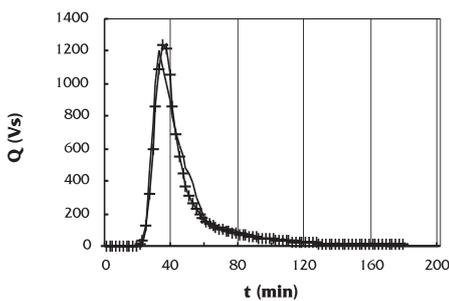
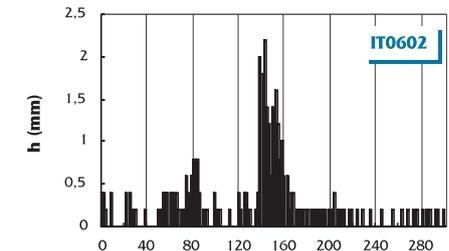
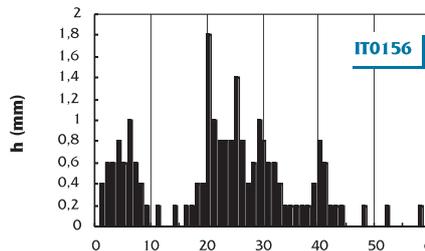
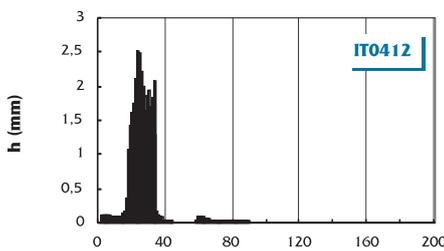
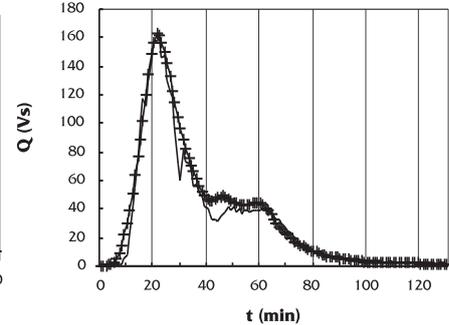
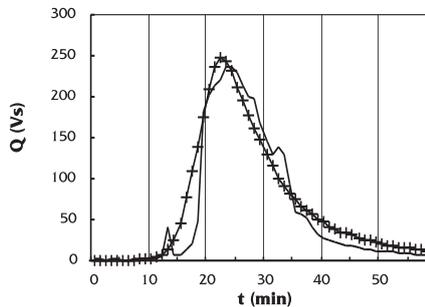
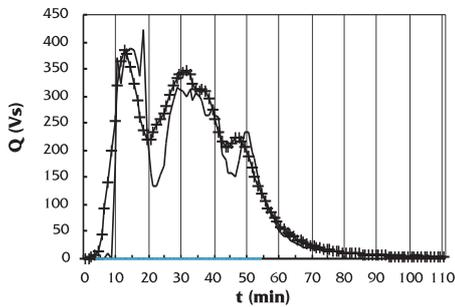
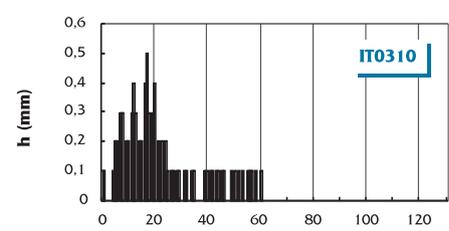
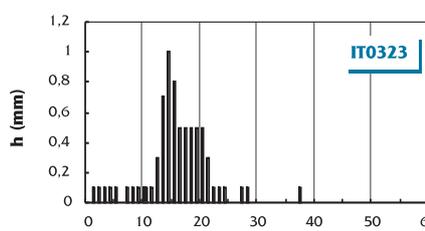
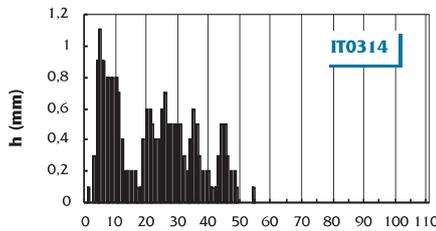
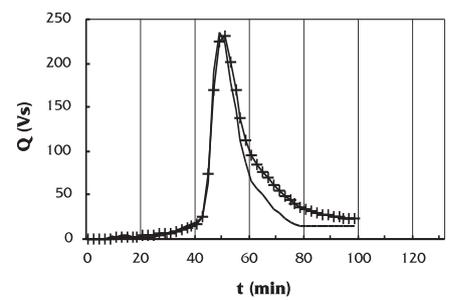
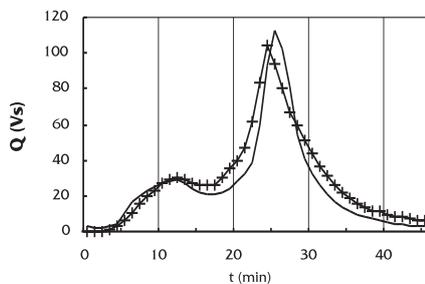
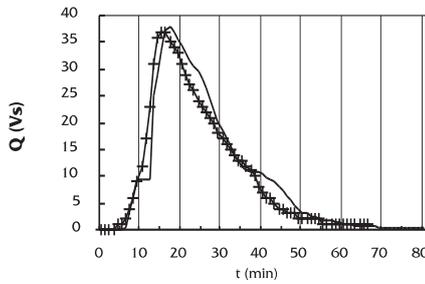
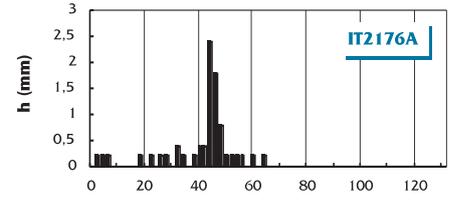
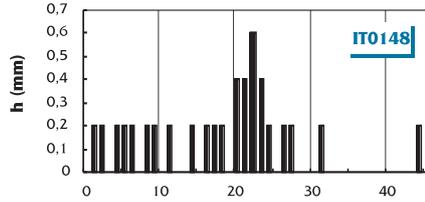
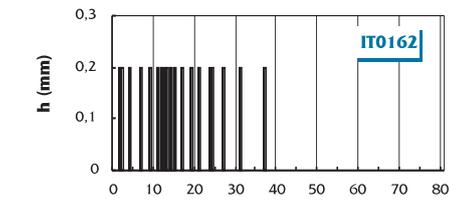
Un esame dei risultati ottenuti conferma che i valori minori del parametro la_1 si hanno all'aumentare della pendenza del bacino. Per quanto riguarda la scabrezza dei sottobacini, la quale ha un significato fisico ma racchiude in sé moltissime cause e quindi assume caratteristiche anche di taratura, essa è risultata variabile da 0.015 a 0.07; ciò costituisce un range accettabile ed in accordo con quanto riportato in letteratura.

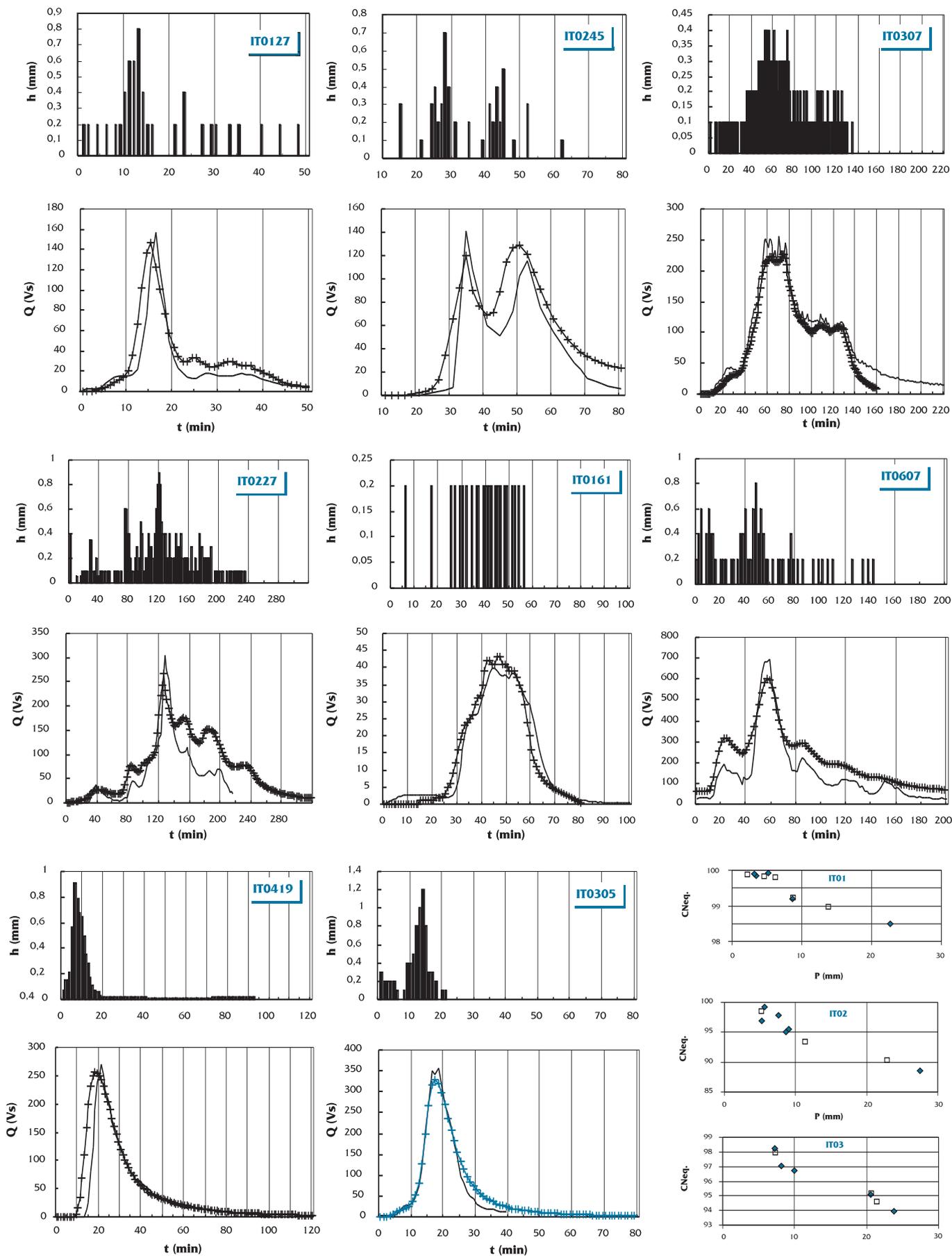
Il valore di CN_{eq} è risultato sempre molto elevato e spesso vicino al valore massimo pari a 100 relativo al caso di perdite nulle, concordando con i valori consigliati relativamente a superfici impermeabili in aree urbane. Per il bacino IT03, si sono riscontrati valori più bassi di tale parametro anche in considerazione delle pendenze che caratterizzano il bacino stesso; ciò può far supporre che siano presenti perdite per infiltrazione in rete, accumuli anomali di acqua sulle superfici impermeabili del bacino, o errori dovuti ad una sopravvalutazione dell'area impermeabile direttamente connessa alla rete.

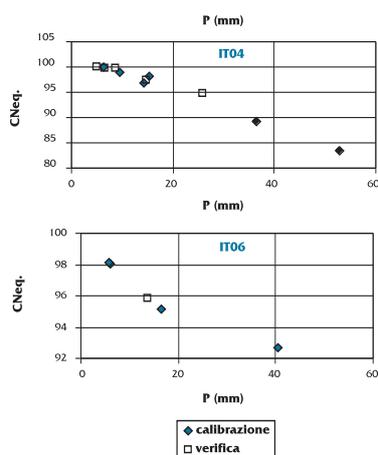
Tabella 5: Caratteristiche principali degli eventi usati per la verifica

Evento	Data	CN_1	la_1 (mm)	P (mm)	AI_1 %	n_1	Pe (mm)	Pe eff. (mm)	Cn_1 eq.	la_1 eq. (mm)	ϕ_{imp}	ϕ
IT0109	15/09/88	98.8	0.2	13.8	12.0	0.040	11.13	11.45	98.97	0.13	0.83	0.76
IT0161	29/03/90	99.8	0.2	4.6	12.0	0.040	13.99	4.07	99.83	0.13	0.88	0.80
IT0163	09/04/90	99.9	0.2	2.2	12.0	0.040	1.73	1.78	99.87	0.13	0.81	0.74
IT0159	26/03/90	99.1	0.2	8.8	12.0	0.040	6.83	7.07	99.23	0.13	0.80	0.73
IT0127	25/02/89	99.8	0.2	6.2	12.0	0.040	5.47	5.56	99.78	0.13	0.90	0.82
IT0245	21/01/88	96.0	0.8	5.3	30.0	0.020	1.34	2.53	98.40	0.56	0.48	0.33
IT2239	05/04/94	69.0	0.8	11.4	30.0	0.020	0.90	4.05	93.32	0.56	0.36	0.25
IT0227	10/12/87	65.0	0.8	22.9	30.0	0.020	4.57	10.07	90.32	0.56	0.44	0.31
IT0304	18/05/89	81.0	0.7	21.5	44.0	0.050	5.38	12.47	94.56	0.39	0.58	0.49
IT0307	26/07/89	84.0	0.7	20.7	44.0	0.050	5.85	12.38	95.13	0.39	0.60	0.51
IT0305	26/07/89	90.0	0.7	7.4	44.0	0.050	1.29	3.98	97.94	0.39	0.54	0.46
IT0418	26/05/90	94.0	2.3	25.9	8.0	0.030	13.99	14.94	94.75	2.12	0.58	0.38
IT0414	13/09/89	97.0	2.3	14.8	8.0	0.030	7.68	8.25	97.38	2.12	0.56	0.36
IT0419	15/06/90	99.7	2.3	6.7	8.0	0.030	3.75	3.98	99.73	2.12	0.59	0.39
IT0409	14/07/89	99.8	2.3	8.8	8.0	0.030	6.03	6.25	99.82	2.12	0.71	0.46
IT0427	17/10/90	99.9	2.3	5.0	8.0	0.030	2.47	2.67	99.91	2.12	0.53	0.35
IT0607	28/09/89	70.0	2.0	13.8	41.0	0.016	1.92	6.71	95.82	1.19	0.45	0.34

TARATURA DI UN MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI SU BACINI SPERIMENTALI URBANI ITALIANI







Conclusioni

La disponibilità di dati sperimentali ha permesso la calibrazione e la verifica di un modello di trasformazione afflussi-deflussi che si basa sul metodo CN con la possibilità di considerare una parte dell'area impermeabile senza perdite e sullo schema dell'onda cinematica in falda ed in rete.

La fase di calibrazione è stata effettuata con una estesa serie di prove e mediante l'utilizzo di un efficace algoritmo di calcolo per la calibrazione dei parametri.

I risultati ottenuti, pur non permettendo generalizzazioni, forniscono utili indicazioni per la valutazione dei parametri per il progetto di reti di drenaggio a servizio di zone urbanizzate.

Ringraziamenti

Ricerca svolta nell'ambito dell'attività post-dottorato sul tema "Gestione e Mitigazione del rischio nei Deflussi Urbani" (lavoro eseguito con fondi M.U.R.S.T. ex 40%)

Bibliografia

- Aron G.; Miller A.C.; Lakatos D.F. (1977). Infiltration formula based on SCS curve number. *J. of Irrigation and Drainage Divn.* 103(4), 419-427.
- Calomino F.; Maksimovic C.; Molino B. (1995). Urban drainage experimental catchments in Italy. Ed. Bios Cosenza.
- Calomino F.; Paoletti A. (1994). Le misure di pioggia e di portata nei bacini sperimentali urbani in Italia. ed. Cen-

- tro Studi Deflussi Urbani, Milano.
- Chen C (1982). Infiltration formulas by curve number procedure. *J. Hyd. Divn.* 108(7), 823-829.
- Doherty J.; Brebber L.; Whyte P., (1994). PEST manual. Watermark Computing, Corinda, Australia.
- Hawkins R.H. (1993). Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *J. of Irrigation and Drainage Eng.* 119(2), 334-345.
- Hawkins R.H.; Hjelmfelt A.T.; Zevenberger A.W.(1986). Runoff probability, storm depth and Curve Number. *J. of Irrigation and Drainage Eng.* 111(4) 330-340.
- Hjelmfelt A.T. (1980) Empirical investigation of curve number technique. *J. Hyd. Divn.* 106(9), 1471-1477.
- Ibrahim Y.; Liang S.Y.(1992). Calibration strategy for urban catchment parameters. *J. Hyd. Eng.* 118(11), 1550-1570.
- HEC-1 User's manual (1988). U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California.
- Jewell T.K.; Nunno T.J.; Adrian D.D.,(1978). Methodology for calibrating stormwater models. *ASCE J. of Env. Eng. Divn., EE3*, pp.485-501.
- Levenberg K., (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Q.Appl.Math.*, 2, 164-168.
- Marquardt D.W., (1963). An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *Journal of the SIAM*, 11(2), 431-441.
- Pagliara S. (1996). The experimental catchment of Fiumetto (Italy): rainfall-runoff analysis. 7° International Conference on Urban Storm Drainage (ICUSD) Vol.III, Hannover, Germany 1813-1817.
- Ponce V.M.(1991). The Kinematic wave controversy. *J. Hyd. Eng.* 117(4), 511-525.
- Soil Conservation Service (1972), National Engineering Handbook, Hydrology, U.S. Dept. of Agriculture Washington.
- Sorooshian S.; Gupta V.K. (1995). Model Calibration in Computer Models of Watershed Hydrology, V.P.Singh ed. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 23-68.
- Veltri P., (1987). Prestazioni e calibrazione dei modelli nell'idrologia urbana, in Orientamenti attuali in Idrologia Urbana, ed.BIOS, Cosenza Italy.
- Yen B.C. (1986). Hydraulics of sewers. In B.C. Yen (Ed.) Advances in Hydroscience, Vol.14, Academic Press, N.Y. 1-122.
- Yen B.C. (1986). Rainfall-runoff process on urban catchments and its modeling. *Urban Drainage Modelling*, Pergamon Press Ltd., Oxford England, 3-26.

