

Analisi di affidabilità del sistema di preallerta di piena in tempo reale MIMI per il bacino del fiume Arno

Paolo Amadio¹, Marco Mancini¹, Giovanni Menduni² e Giovanni Ravazzani¹

¹Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Costruzioni Idrauliche, Ambientale, Infrastrutture Viarie e Rilevamento

²Segretario Autorità di Bacino del Fiume Arno

E-mail: giovanni.ravazzani@polimi.it

SOMMARIO. Le soglie pluviometriche di allarme di piena costituiscono uno strumento che permette di discriminare se la precipitazione meteorica prevista da modelli meteorologici ad area limitata o in atto determini, in sezioni critiche del reticolo idrografico, portate di piena tali da destare stato di allerta negli organismi preposti alle funzioni di protezione civile. Fissata la sezione fluviale esse individuano l'altezza di precipitazione lorda ragguagliata che per diverse durate genera la portata di guardia. Nel caso di studio del bacino dell'Arno si sono considerate tredici sezioni fluviali rappresentative dei tronchi più critici ai fini di fenomeni di esondazione. Il sistema di allerta è implementato in un codice di calcolo dedicato (MIMI - Modello Integrato Meteo-Idrologico), che acquisisce i dati di precipitazione sia in previsione che in tempo reale trasmessi all'Autorità di Bacino dell'Arno e discrimina quindi lo stato di allerta o meno sulla base del valore di pioggia ragguagliato. Il presente studio riguarda l'analisi di affidabilità del sistema di preallarme di piena MIMI. L'analisi effettuata per le diverse sezioni fluviali considerate, si basa sia sugli eventi storici registrati nel periodo 1992-2000, che su eventi sintetici appositamente generati col modello NSRP.

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni si è assistito ad una notevole crescita di attenzione verso i problemi della difesa dagli eventi alluvionali. In riferimento alla realtà italiana, il progetto AVI (Aree Vulnerabili Italiane, 1998), sviluppato dal GNDICI (Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche), ha censito un numero totale di 7178 eventi alluvionali dal 1918 al 1994, che hanno coinvolto il 42,5% dei comuni italiani.

Di fronte a tale incremento della frequenza delle esondazioni, risulta evidente la necessità di studiare misure atte alla mitigazione delle piene fluviali. Accanto agli interventi di tipo strutturale volti direttamente a ridurre i colmi di piena si collocano i sistemi di allerta di piena.

Un efficace servizio di allarme di piena richiede, quale indispensabile supporto tecnico, una successione di previsioni idrometeorologiche, caratterizzate da precisione crescente al diminuire dell'orizzonte temporale delle previsioni stesse.

La scala spaziale del problema riveste una importanza fondamentale ai fini della previsione statistica e del preannuncio delle piene (Rosso, 1996). Dal momento che le sezioni fluviali analizzate drenano bacini con area inferiore a 1.000 Km² la sola modellazione idrologica non è sufficiente, per via della rapidità della trasformazione delle precipitazioni in ruscellamento e deflusso alveato, a rispondere con sufficiente anticipo alle necessità operative. In questi casi, bisogna giocoforza introdurre in ingresso al modello idrologico le previsioni quantitative di precipitazione, che si possono ottenere con l'ausilio di modelli di previsione meteorologica alla mesoscala (Burlando *et al.*, 1993; Castelli *et al.*, 1998). Le previsioni meteorologiche quantitative su aree limitate, soprattutto se supportate da modelli di disaggregazione spaziale fisicamente basati (Meneguzzo *et al.*, 1997, La Barbera *et al.*, 1996), sono in grado di fornire dati significativi ai fini della modellazione al suolo degli scenari idrologici di piena con un anticipo di 24-48 ore.

In questo contesto possono rivelarsi utili alcune conoscenze 'a priori' sulla pericolosità di un campo di precipitazione atteso o osservato per la sezione

fluviale presa in considerazione. Una sintesi di queste conoscenze è rappresentata dalle linee segnalatrici di precipitazione critica cumulata a scala di bacino, le quali definiscono i valori critici di pioggia in grado di innescare verosimilmente fenomeni di esondazione nella sezione di interesse del bacino colpito da un nubifragio.

2 IL CASO DI STUDIO DEL BACINO IDROGRAFICO DEL FIUME ARNO

A seguito della L.183/89 il bacino del fiume Arno venne classificato come uno degli 11 bacini di interesse nazionale e fu istituita la figura dell'Autorità di Bacino, con funzione di programmazione e intesa tra Stato e Regione, per problemi di natura idraulica, di difesa del suolo e di qualità delle acque. Da allora, oltre agli interventi di tipo strutturale atti alla mitigazione del rischio di esondazione, l'attività dell'Autorità di Bacino si è rivolta alla messa a punto di un sistema di previsione e preannuncio delle piene (ARTU) finalizzato alla riduzione della vulnerabilità del territorio. Nell'ambito di tale progetto si inserisce lo sviluppo del sistema di preallarme di piena MIMI (Modello Integrato Meteo Idrologico).

Per l'implementazione del modello di preallerta di piena, sono state individuate quelle sezioni fluviali che presentano particolari insufficienze idrauliche causa di frequenti esondazioni. Per i tronchi presi in esame sono quindi state individuate le portate di guardia come quelle che mediamente garantiscono un franco di sicurezza di 1 metro. Il valore di portata per il quale si calcolano le soglie pluviometriche è un valore di guardia idraulico per l'intero tronco critico in esame essendo l'esondazione di un tronco fluviale spesso non confinabile in una precisa sezione trasversale del corso d'acqua.

Per quanto riguarda il corso principale del fiume Arno, sono state individuate, di concerto con l'Autorità di Bacino, cinque sezioni salienti: Subbiano e Rassina, che sottendono il bacino del Casentino, San Giovanni in Valdarno, che sottende la parte iniziale della Valdarno Superiore a valle della confluenza della Chiana, Rignano, che chiude la Valdarno Superiore a monte della confluenza della Sieve, e Nave di Rosano, a monte di Firenze, laddove l'Arno sottende anche il bacino idrografico della Sieve (Figura 1).

Sul bacino del fiume Sieve, inoltre, sono state individuate le sezioni di Sagginale, Vicchio, Contea, Rufina e Pontassieve, elencate da monte verso valle.

Sugli affluenti dell'Arno a valle di Firenze si sono individuate le sezioni di San Piero a Ponti sul fiume Bisenzio e Poggio a Caiano e Quarrata sul fiume Ombrone.

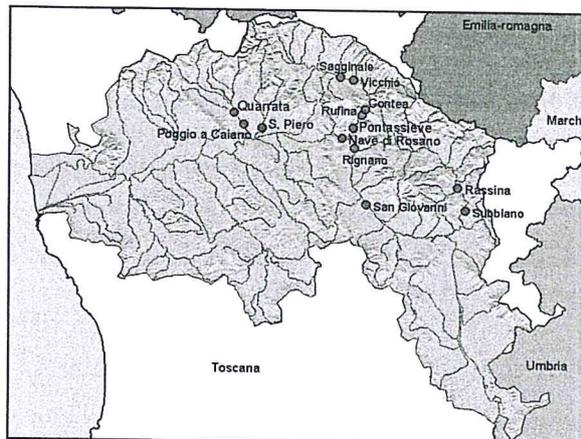


Figura 1. Sezioni critiche individuate sul corso dell'Arno e su alcuni dei suoi affluenti.

3 VALUTAZIONE DELLE SOGLIE PLUVIOMETRICHE

Le soglie pluviometriche di guardia idraulica o di preallarme definiscono la quantità di precipitazione lorda che per assegnata durata genera una portata di guardia in una prefissata sezione fluviale. Queste soglie si basano sulla ricerca della soluzione inversa della classica trasformazione afflussi meteorici in deflussi di piena. Infatti, assegnata una portata di guardia nelle sezioni caratteristiche di un tronco fluviale, si determina tramite modellistica numerica la quantità di precipitazione lorda, che per diverse durate determina la portata di piena assegnata.

L'impiego della simulazione idrologica per la valutazione delle linee segnalatrici di precipitazione cumulata critica comporta l'esecuzione di esperimenti di simulazione in grado di enucleare, in base ai diversi scenari di precipitazione che si possono potenzialmente verificare su un bacino idrografico, la configurazione critica del campo di precipitazione che corrisponde al superamento della prefissata portata critica di riferimento nella sezione di chiusura del bacino stesso.

La soluzione del problema inverso per la determinazione della precipitazione di soglia è stata condotta numericamente tramite il modello idrologico distribuito FEST98 (Mancini *et al.*, 2000, Montaldo *et al.*, 2002).

Per quanto riguarda l'andamento temporale della precipitazione si sono considerati gli andamenti tipici degli eventi di pioggia che si verificano nei climi temperati, rappresentati sotto forma di ietotipi

standard con intensità: costante, linearmente crescente e linearmente decrescente.

Un ulteriore fattore di variabilità riguarda infine lo stato iniziale del sistema, rappresentato dalle condizioni di imbibimento dei terreni del bacino idrografico. L'umidità del terreno presenta una dinamica spazio-temporale assai complessa e la sua valutazione richiede modelli matematici sofisticati e un fitto controllo di campo tramite misure specifiche. Lo scopo applicativo del lavoro in oggetto richiede, d'altro canto, criteri di valutazione di uso semplice e immediato. A tale scopo, l'unico indicatore efficace è rappresentato dalla stessa precipitazione antecedente l'episodio idrometeorologico preso in esame. Di qui la necessità di implementare un indice sintetico di semplice e immediata valutazione, seppure grossolano, quale l'indice AMC del Soil Conservation Service (USDA, 1986). Tale indice rappresenta lo stato di imbibimento in tre classi: stato o tipo I, per bacino complessivamente asciutto; tipi II e III rispettivamente per bacino mediamente e fortemente imbibito.

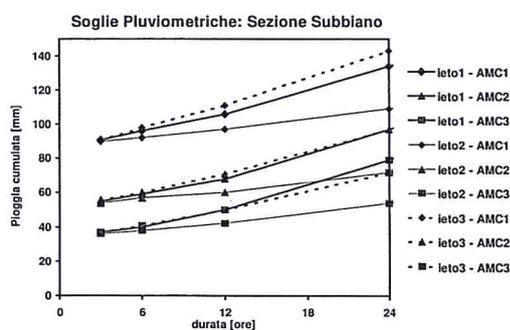


Figura 2. Soglie pluviometriche di preallerta per la sezione di Subbiano.

In definitiva, la soluzione adottata per la conduzione degli esperimenti numerici di simulazione di scenario si basa sulla generazione di piogge uniformi nello spazio e con assegnato andamento nel tempo. La simulazione della trasformazione afflussi-deflussi viene quindi condotta a partire da una prefissata condizione iniziale di imbibimento, secondo i tre tipi AMC I, II e III. Per via iterativa, viene quindi ricercata la minima altezza di pioggia cumulata, ragguagliata sul bacino in esame, in grado di provocare il superamento della prefissata soglia di portata al colmo nella sezione di chiusura del bacino stesso. Questo procedimento va ripetuto per durate progressivamente crescenti a partire dall'origine dell'asse temporale, identificando in tal modo la richiesta curva sul piano (P,d). Il procedimento viene iterato indipendentemente per i tre tipi AMC, determinando così le tre curve associate a

stato iniziale asciutto, mediamente e fortemente imbibito, e per i tre ietotipi presi in esame (figura 2).

4 IL SISTEMA DI PREANNUNCIO DI PIENA IN TEMPO REALE MIMI

MIMI, acronimo di Modello Integrato Meteo Idrologico, consente di implementare un sistema per la determinazione delle situazioni di preallerta di piena mediante soglie pluviometriche.

Dopo una fase sperimentale durata più di un anno, dall'inizio del 2002 il sistema è in funzione presso l'Autorità di Bacino del fiume Arno con sede a Firenze. Le sezioni monitorate in questa prima fase riguardano il bacino idrografico dell'Arno a monte della città di Firenze comprendendo le sezioni di Rassina, Subbiano, San Giovanni Valdarno, Rignano, Nave di Rosano, Sagginale, Vicchio, Contea, Rufina e Pontassieve.

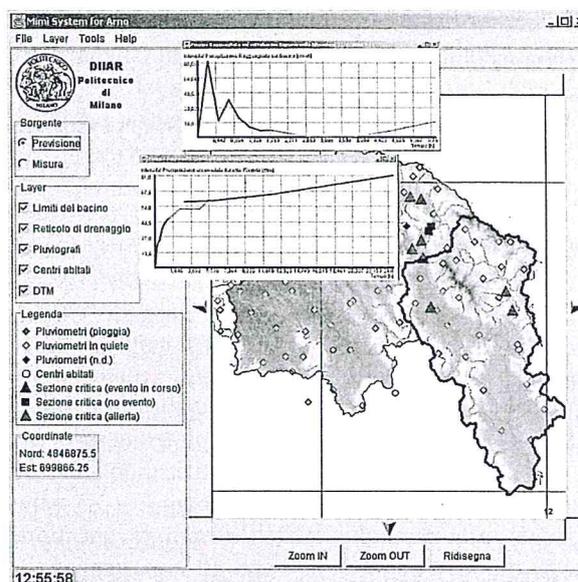


Figura 3. Client per la visualizzazione delle situazioni di allerta. L'operatore può visualizzare i diagrammi di precipitazione aggregata e cumulata per ogni sezione critica in cui è in atto un evento. I diagrammi mostrano la situazione basata sui dati misurati e quelli previsti.

4.1 ARCHITETTURA DEL SISTEMA

MIMI' è costituito da tre sottosistemi interoperanti (figura 4): il Data Server, l'Hydro Server e il Client. Il Data Server ha il compito di acquisire i dati delle osservazioni e delle previsioni ed effettuare una preelaborazione utile per l'implementazione del modello idrologico. L'Hydro Server è il modulo centrale che implementa il modello idrologico e ge-

nera i dati relativi alla situazione osservata o prevista. Il Client si occupa della visualizzazione dei dati e della segnalazione delle situazioni di preallerta.

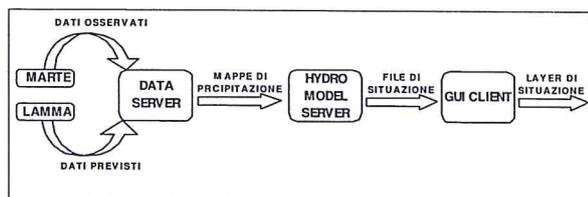


Figura 4. Architettura del sistema MIMI.

4.2 DATI IN INGRESSO

MIMI richiede in ingresso dati di precipitazione sia misurata che prevista. I dati misurati sono forniti dal Sistema MARTE come letture dei pluviografi aggiornate ogni 15'. I dati di previsione sono forniti dal LAMMA mediante il Modello ad Area Locale RAMS, come mappe di precipitazione con risoluzione 4x4 km relative ad ogni ora fino a 24 ore dal tempo attuale.

4.3 MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA DI ALLERTAMENTO

L'utilizzo pratico delle soglie richiede, in primo luogo, la scelta della curva di riferimento in base alle stimate condizioni di imbibimento iniziale del terreno in termini di indice AMC e alla prevista evoluzione temporale del campo di precipitazioni in termini di ietotipo. Successivamente si entrerà nel grafico coi dati di altezza raggiunta cumulata (Hragg) e di durata (d) della precipitazione prevista o osservata in tempo reale, identificando così un 'punto' di previsione sul piano (Hragg, d). La valutazione sulla pericolosità dell'evento in questione viene quindi condotta in base all'appartenenza o meno del punto alla regione critica (figura 5)

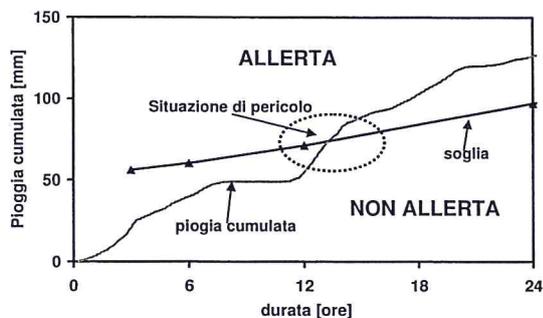


Figura 5. Identificazione di una situazione di allerta mediante l'impiego della soglia pluviometrica.

5 ANALISI DI AFFIDABILITÀ DEL SISTEMA

Per la verifica dell'affidabilità di MIMI sono necessari i dati pluviometrici sul bacino e i dati idrometrici relativi alla sezione d'interesse che consentono di classificare gli eventi di pioggia in base alle seguenti condizioni:

- portata alla sezione maggiore o minore della portata critica
- pioggia cumulata raggiunta superiore o inferiore alla soglia pluviometrica di preallerta.

Si ottengono così le tipologie di allarme di seguito elencate:

NESSUN ALLARME: indica la situazione in cui la portata di guardia non viene superata ed il sistema di preallerta non segnala allarmi;

GIUSTO ALLARME: indica la situazione in cui la portata di guardia viene superata e preannunciata correttamente da una segnalazione di allarme del sistema;

FALSO ALLARME: indica quella situazione in cui il sistema preannuncia un allarme che non trova riscontro nell'osservazione della portata di piena;

MANCATO ALLARME: si riferisce ad una situazione in cui, a fronte del superamento della portata di guardia, il sistema non preannuncia l'allarme;

ALLARME TARDIVO: si riferisce alla situazione in cui il sistema segnala un allarme effettivamente verificatosi, ma con un certo ritardo.

L'insieme dei GIUSTI ALLARME e dei NO ALLARME costituisce il grado di buon funzionamento del sistema di preallerta, i FALSI ALLARMI danno una misura di quanto le soglie pluviometriche di preallerta siano cautelative (fattore di sicurezza) e il complesso dei MANCATI ALLARMI e ALLARMI TARDIVI costituisce il mal funzionamento del sistema.

5.1 I DATI STORICI

Analizzando i dati pluviometrici ed idrometrici è possibile determinare il grado di buon funzionamento del sistema, così come definito al paragrafo precedente, per ogni sezione critica che dispone di misure di portata. Al fine della verifica si ritiene opportuno considerare solo gli eventi significativi, quelli cioè che superano un valore di portata "Q_{lim}" prefissato per ogni sezione indagata.

Tabella 1. Risultati dell'analisi di affidabilità del sistema di preallerta MIMI sulla base dei dati idropluviometrici storici.

TIPO DI ALLARME	Sezione di Nave di Rosano		Sezione di Subbiano		Sezione di Pontassieve		Sezione di S. Piero a Ponti		Sezione di Poggio a Caiano	
	N° eventi	%	N° eventi	%	N° eventi	%	N° eventi	%	N° eventi	%
NO ALLARME	8	66.67	9	52.94	15	65.21	3	75	11	91.67
GIUSTO ALLARME	2	16.67	2	11.76	4	17.39	0	0	1	8.33
FALSO ALLARME	1	8.33	3	17.66	1	4.35	1	25	0	0
MANCATO ALLARME	1	8.33	1	5.88	1	4.35	0	0	0	0
ALLARME TARDIVO	0	0.00	2	11.76	2	8.70	0	0	0	0
N°eventi significativi	2		17		23		4		12	
Grado di corretto funzionamento [%]	83.34 %		64.7 %		82.6 %		75 %		100 %	

In Tabella 1 vengono riportati i risultati dell'analisi per le sezioni critiche considerate. Si evince complessivamente un grado di corretto funzionamento sufficientemente elevato con valori che vanno dal 64.7% per il bacino del Casentino (sezione di Subbiano) al 100% per il bacino dell'Ombrone (sezione di Poggio a Caiano). Su un totale complessivo di 68 eventi individuati, in soli 3 casi si è riscontrato un mancato allarme. In tutti e tre i casi si osserva una portata al colmo di poco superiore alla portata di guardia e, comunque, non si sono verificate esondazioni significative sul territorio.

5.2 I DATI SINTETICI

L'analisi di affidabilità del sistema di preallerta di piena MIMI condotta con l'analisi dei dati idrometeorologici storici raccolti dalla rete di monitoraggio, ha evidenziato un comportamento del sistema complessivamente buono e variabile da sezione a sezione. I risultati così ottenuti sono però basati su un campione di eventi non sufficientemente numeroso a garantire la robustezza delle statistiche; basti pensare che il risultato migliore (sezione di Poggio a Caiano) è stato ottenuto da un campione di 12 eventi dei quali, però, solo uno ha superato la portata di guardia.

Per verificare il funzionamento del sistema sulla base di un numero maggiore di eventi, è stato utilizzato un modello stocastico di generazione di dati di pioggia sintetici (Burlando, 1997) con il quale sono stati prodotti 500 anni di serie pluviometriche a scansione oraria. Con la trasformazione degli afflussi nei corrispondenti deflussi di piena alle diverse sezioni critiche mediante il modello idrologico distribuito FEST98RS, si è reso

disponibile un campione di piogge cumulate e idrogrammi di piena sufficientemente ampio per effettuare una analisi di affidabilità del sistema MIMI più robusta.

Nelle tabella 2 si riportano i risultati dell'analisi di affidabilità per le sezioni critiche di chiusura dei principali bacini idrografici. Per ogni sezione viene indicato il numero totale degli eventi individuato dal sistema nel processamento dei 500 anni di dati di pioggia, il numero effettivo degli eventi considerati nell'analisi condizionati al superamento di una portata limite, il numero dei "nessun allarme", "giusto allarme", "falso allarme", "mancato allarme" e "allarme tardivo" riscontrati dal sistema e la percentuale di buon funzionamento. Viene indicato, inoltre, il numero degli eventi che hanno fatto registrare una portata al colmo (Q_{max}) superiore alla portata di guardia ($Q_{guardia}$).

Si osserva innanzitutto che il numero degli eventi significativi, cioè quelli condizionati al superamento di una portata minima Q_{lim} , siano in numero sufficiente a garantire la robustezza dell'analisi di affidabilità: il numero di questi eventi varia da un minimo di 199 per la sezione di Poggio a Caiano ad un massimo di 754 per la sezione di Pontassieve. Di questi eventi, quelli che hanno superato la portata di guardia vanno da un minimo di 45 sempre per la sezione di Poggio ad un massimo di 306 per la sezione di Pontassieve. La percentuale di buon funzionamento si attesta mediamente al di sopra dell' 85% con punte del 93% per il bacino dell'Ombrone e valori attorno al 77% per le sezioni appartenenti al bacino dell'Alta Valdarno.

Tabella 2. Risultati dell'analisi di affidabilità del sistema di preallerta MIMI sulla base dei dati di pioggia sintetici.

TIPO DI ALLARME	Sezione di Nave di Rosano		Sezione di Subbiano		Sezione di Pontassieve		Sezione di S. Piero a Ponti		Sezione di Poggio a Caiano	
	N° eventi	%	N° eventi	%	N° eventi	%	N° eventi	%	N° eventi	%
NO ALLARME	197	49.87	331	52.54	405	53.71	116	44.11	153	76.88
GIUSTO ALLARME	110	27.85	197	31.27	261	34.62	90	34.22	33	16.59
FALSO ALLARME	13	3.29	36	5.71	43	5.70	24	9.13	1	0.50
MANCATO ALLARME	56	14.18	56	8.89	40	5.31	29	11.02	11	5.53
ALLARME TARDIVO	19	4.81	10	1.59	5	0.66	4	1.52	1	0.50
N°eventi significativi	395		630		754		263		199	
N°eventi individuati dal sistema	25447		38662		26943		33722		31387	
N°eventi con $Q_{max} > Q_{guardia}$	185		263		306		123		45	
Grado di corretto funzionamento [%]	77.72		83.81		88.33		78.33		93.47	

5.3 VALIDAZIONE DEI DATI SINTETICI PUNTUALI

Punto di partenza per la generazione delle piogge sintetiche sono le stime del valore mensile dei parametri λ , μ_c , β , μ_x e δ . Nel presente lavoro sono state usate le stime relative a 14 pluviometri distribuiti sul bacino dell'Arno effettuate nell'ambito del progetto POPSICLE (Burlando, 1997). Per testare la validità del modello usato e confermare la bontà dei parametri utilizzati si effettua un controllo a campione su alcuni pluviometri distribuiti sul bacino dell'Alto Arno che consiste nell'analisi delle statistiche storiche e del processo estremo.

Essendo interessati all'elaborazione di statistiche a partire dai dati sintetici, innanzitutto si è verificata la capacità di riprodurre gli eventi estremi, descritti dalle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica che esprimono, per fissato tempo di ritorno, il legame tra altezza di pioggia e durata dell'evento. Si è così effettuato un confronto tra le linee segnalatrici ricavate dall'elaborazione dei dati storici di massima intensità di pioggia per diverse durate disponibili dall'anno 1923, con le linee segnalatrici

bilì dall'anno 1923, con le linee segnalatrici elaborate a partire dalle serie temporali di 500 anni di dati sintetici.

Dal confronto grafico (Figura 6) si nota una buona capacità di riprodurre gli eventi estremi per tempi di ritorno di 10 e 100 anni che in alcune stazioni (Camaldoli, La Verna, Borgo San Lorenzo, Firenze) raggiunge la quasi perfetta sovrapposizione.

Alle piogge sintetiche è chiesto non solamente la capacità di riprodurre gli eventi estremi ma, in generale, di descrivere nel modo più congruo la climatologia delle precipitazioni locali per raffrontarsi con degli eventi di pioggia con caratteristiche simili a quelli reali. Per questo motivo, è stata operata una ulteriore verifica mettendo a confronto il numero medio di giorni di pioggia e la precipitazione media a scala annuale. Si osserva (Figura 7) che i dati relativi ai giorni di pioggia annui e alla precipitazione annua ottenuti con le piogge sintetiche ben si adattano a quelli reali, tenendo in considerazione il fatto che questa analisi è stata effettuata su un set di dati reali che all'epoca della taratura del modello NSRP non era disponibile.

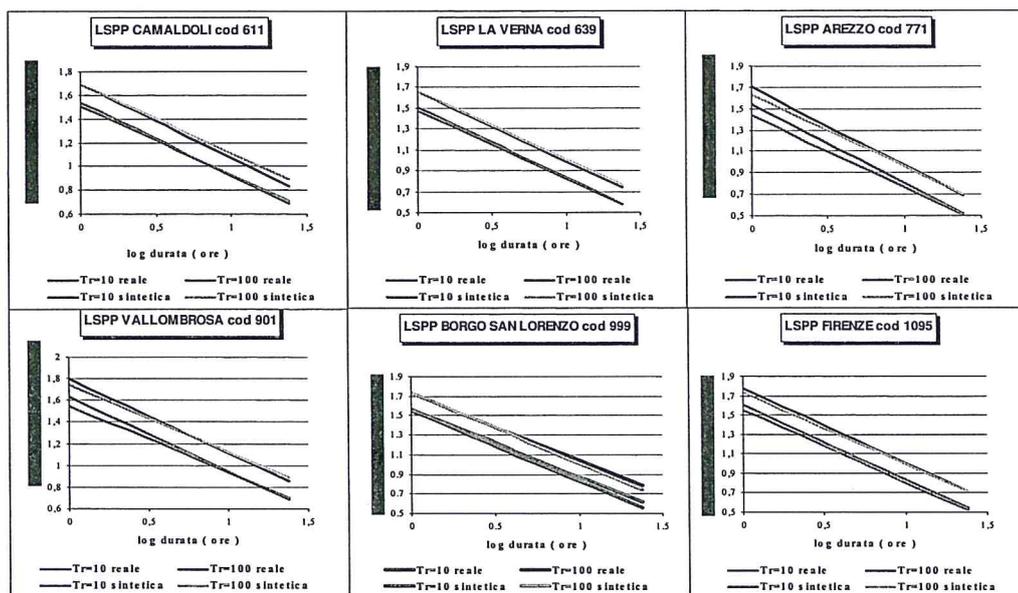


Figura 6. Confronto tra le linee segnalatrici ricavate dall'elaborazione dei dati storici di massima intensità di pioggia per diverse durate disponibili dall'anno 1923, con le linee segnalatrici elaborate a partire dalle serie temporali di 500 anni di dati sintetici.

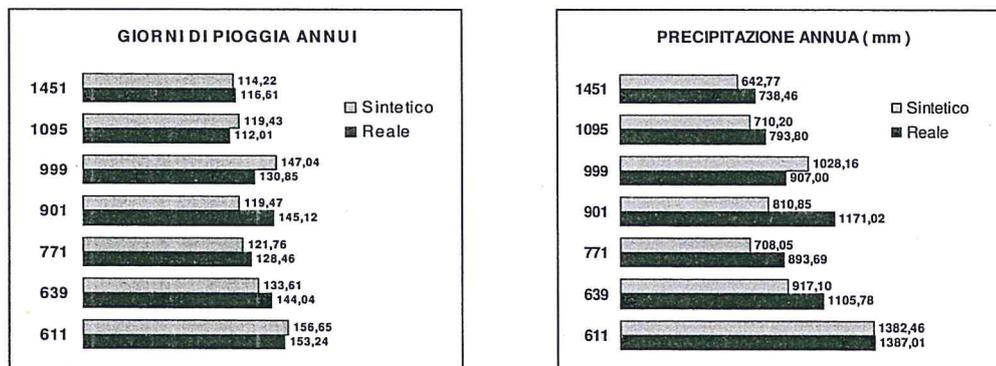


Figura 7. Confronto tra giorni medi di pioggia annui e precipitazione media risultati dall'esame dei 500 anni di dati sintetici e dei dati storici per gli anni compresi tra il 1992 e il 2000.

6 CONCLUSIONI

Si è visto come negli ultimi anni sia cresciuta la sensibilità verso i disastri naturali ed in particolare verso i danni conseguenti alle alluvioni. Questa tendenza è dovuta all'incremento della frequenza degli eventi alluvionali e all'aumento dei danni economici che risultano maggiori anche per l'aumentato valore dei beni esposti al rischio. L'Italia è una nazione che per la natura del suo territorio è stata interessata storicamente da eventi alluvionali. Ma è solo recentemente, grazie allo sviluppo delle tecnologie informatiche e delle telecomunicazioni, che si vanno sviluppando i si-

stemi di allerta di piena in tempo reale finalizzati alla riduzione della vulnerabilità del territorio. Data la dimensione territoriale che caratterizza la maggior parte dei bacini idrografici italiani, con aree che raramente superano i 1.000 km², la conoscenza a priori della pericolosità di un campo di precipitazione atteso od osservato può aumentare l'orizzonte temporale del preannuncio di piena aumentando così i benefici derivanti. Questo tipo di sistema di preallarme ha il pregio di sintetizzare in un valore di altezza di pioggia critica tutta la complessità dei fenomeni alla base della formazione delle piene fluviali. Proprio per questo motivo l'analisi idrologica a priori deve garantire la corretta rappresentazione dei fenomeni di piena in un bacino idrografico.

La quantità di pioggia che, per assegnata durata, induce la crescita dell'idrogramma di piena fino al raggiungimento della portata di guardia in una prefissata sezione fluviale, definita anche "soglia pluviometrica", è stata valutata come soluzione inversa della classica trasformazione degli afflussi meteorici nei deflussi di piena. Per ridurre l'incertezza associata alla non linearità della trasformazione afflussi-deflussi, sono state considerati tre gradi di umidità del suolo all'inizio dell'evento di piena, parametrizzati con l'indice di pioggia antecedente (API) del Soil Conservation Services e tre differenti tipi di ietogrammi di pioggia caratterizzati da intensità costante, linearmente crescente e decrescente, che descrivono gli andamenti tipici degli eventi di pioggia che si verificano nei climi temperati.

Una prima analisi di affidabilità è stata valutata sulla base degli eventi storici registrati a partire dall'anno 1992. Ne è risultato un grado di corretto funzionamento del sistema per le diverse sezioni monitorate compreso tra circa il 64% e il 100%, anche se le statistiche sono basate su un campione di eventi non sufficientemente esteso.

L'analisi di affidabilità condotta sugli eventi di pioggia generati con un modello stocastico ha comunque confermato che il sistema di preallerta mantiene il suo buon funzionamento al di sopra del 77% con un massimo del 94%.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro presentato è frutto degli studi condotti nell'ambito del Contratto di Ricerca stipulato tra l'Autorità di Bacino del Fiume Arno e il Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano in tema di "Valutazione delle Soglie Idrometeorologiche di Preallarme delle Piene Fluviali nel Bacino dell'Arno". Un particolare ringraziamento va all'Ing. Bernardo Mazzanti del Servizio Idrografico e Mareografico, ufficio di Pisa. Si ringrazia, inoltre, il Prof. Burlando dell'*Institute of Hydromechanics and Water Resources Management* di Zurigo per il supporto fornito nell'ambito della modellistica per la generazione di dati di pioggia sintetici.

BIBLIOGRAFIA

AVI, Aree Vulnerabili Italiane, Catalogo delle informazioni sulle località italiane colpite da frane e da inondazioni, Volume II -

inondazioni, pubblicazione CNR - GNDCI n. 1799, 1998.

Burlando, P., G. Grossi, A. Montanari and R. Rosso, "POPSICLE - Production of precipitation scenarios for impact assessment of climate change in Europe", EC Framework III Project RTD EV5V-CT94-0510, Contractor's Final Report of CIRITA Politecnico di Milano, Milano, Italy, 1997.

Burlando, P., Rosso, R., Cadavid, L., Salas, J.D., "Forecasting of short-term rainfall using ARMA models", *Journal of Hydrology*, Vol. 144, pp.193-211, 1993.

Castelli, F., Becchi, I., "Sulla gestione economicamente ottimale di misure anti - alluvionali integrate di tipo strutturale e non", in *Atti del XXVI Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche*, Catania, 1998.

La Barbera, P., Lanza, L., "Disaggregazione dei processi di pioggia alle scale di bacino", in: *Tempeste Mediterranee: valutazione e previsione degli effetti al suolo*, a cura di CNR-GNDCI, 1996.

Mancini, M., Montaldo, N., Rosso, R., "Effetti di laminazione di un sistema d'invasi artificiali nel bacino del fiume Toce", *L'Acqua*, 4, 33-42, 2000.

Meneguzzo, F., Giarola, S., Grippa, G., Zozzini, B., "Mesoscale Operational Rainfall Forecasts in North-Western Tuscany", *Bollettino Geofisico*, 1997.

Montaldo, N., Toninelli, V., Mancini, M., Rosso, R., "Coupling Limited Area Models with Distributed Hydrologic Models for Flood Forecasting: the Toce Basin Study Case", *IAHS publ. no. 274*, 229-236, 2002.

Rosso, R., "La previsione del rischio alluvionale: regime di piena e portate temibili", in: *La sistemazione dei corsi d'acqua naturali*, a cura di U. Maione e A. Brath, Editoriale Bios, Cosenza, pp.195-228, 1996.

USDA - U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, Rev. ed., U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., U.S.A., 1986.