Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
134° (2016), Vol. XL, Parte II, pp. 125-135

PASQUALE VERSACE* – DAVIDE L. DE LUCA*

Modelli di Previsione e Rischio di Esondazione**

Riassunto – La memoria offre una sintetica panoramica delle principali tipologie di modelli per la previsione in tempo reale delle piene, focalizzando l'attenzione anche sul precursore precipitazione, e in particolare sulla modellistica per il *nowcasting* delle piogge. Tutti i modelli descritti sono finalizzati alla previsione (deterministica o probabilistica) in tempo reale del superamento di valori critici di portata (o di tirante idrico) al di sopra dei quali, in corrispondenza delle sezioni fluviali di interesse, possono verificarsi fenomeni di esondazione.

Parole chiave: previsione delle piene, nowcasting delle piogge, sistemi di preannuncio

Abstract – This paper provides a concise overview of the main types of models for real-time flood forecasting, focusing on the rainfall precursor and, in particular, on modeling for *nowcasting*. All the described models aim at the prediction (deterministic or probabilistic) in real time of exceedance related to critical values of discharge (or water depth) above of which, at the river sections of interest, inundation phenomena may occur.

Key words: real-time flood forecasting, rainfall nowcasting, early warning systems

1. Introduzione

La previsione in tempo reale delle piene costituisce una componente essenziale dei sistemi di preannuncio, che ormai da molti anni si stanno diffondendo, sempre più numerosi, anche nel nostro Paese. La letteratura riporta un gran numero di casi applicativi, tra i quali si possono ricordare solo a titolo di esempio: il sistema ARTU relativo al bacino del fiume Arno (http://www.arno.autoritadibacino.it), il sistema

* Dipartimento di Ingegneria Informatica, Modellistica, Elettronica e Sistemistica, Università della Calabria, Ponte Pietro Bucci cubo 41B, 87036 Arcavacata di Rende (CS).
E-mail: pasquale.versace@unical.it • davide.deluca@unical.it

** La relazione è stata presentata nell'ambito della giornata di studio su: «Rischio Idrogeologico. Previsione, Prevenzione e Controllo», Arcavacata di Rende, 8 aprile 2016.

del bacino del Po (Rabufetti & Barbero, 2005), l'*Automated Flood Warning System* (AFWS) dello *US National Weather System* (afws.erh.noaa.gov/afws/rss.php), e lo *European Flood Alert System* (EFAS; Thielen *et al.*, 2009).

Per distinguere i diversi metodi e la tipologia di modelli da utilizzare per la previsione può essere utile considerare che in un sistema di preannuncio possono essere definiti quattro tempi caratteristici (Capparelli & Versace, 2011), indicati in Figura 1:

– il tempo di evoluzione τ_3, tra l'innesco del fenomeno indotto e il suo impatto al suolo;

– l'intervallo temporale τ_2 tra l'occorrenza dell'evento precursore (la pioggia) e l'innesco del fenomeno indotto;

– l'intervallo temporale τ_1 compreso tra la previsione del precursore e il suo verificarsi;

– il tempo di intervento τ^*, necessario per prendere decisioni riguardanti l'evacuazione e la salvaguardia di strutture ed infrastrutture.

In base a tale schematizzazione, si possono distinguere i seguenti tre casi:

Caso 1. $\tau^* < \tau_3$: per il preannuncio è sufficiente l'acquisizione in tempo reale delle sole informazioni riguardanti l'inizio della formazione, a monte della sezione di interesse, dell'onda di piena, e modellare la sua propagazione verso valle. Il fenomeno è caratterizzato da un'evoluzione che richiede tempi abbastanza lunghi, e riguarda bacini idrografici con elevati valori del tempo di corrivazione;

Caso 2. $\tau_3 < \tau^* < (\tau_3 + \tau_2)$: è necessario acquisire in tempo reale anche le misure di pioggia al suolo, ed usare una idonea trasformazione delle precipitazioni in portata. Le piene evolvono in tempi più brevi, e interessano soprattutto bacini idrografici con bassi valori del tempo di corrivazione;

Caso 3. $\tau^* > (\tau_3 + \tau_2)$: la previsione delle precipitazioni diventa di fondamentale importanza, in quanto la risposta del bacino alla forzante meteorologica è molto rapida, come accade in particolar modo bacini con tempi di corrivazione molto bassi (inferiori all'ora).

In questa memoria, le principali tipologie di modelli per la previsione delle piene, presenti in letteratura, sono brevemente descritte nella Sezione 2 e raggruppate in modelli di propagazione (utilizzabili per il Caso 1 precedentemente discusso), e modelli afflussi-deflussi (idonei per i Casi 2 e 3). Nella Sezione 3 l'attenzione è rivolta al precursore precipitazione. In particolare, si riporta una sintetica panoramica della modellistica utilizzabile per il *nowcasting* delle piogge (necessario per il Caso 3), evidenziando l'importanza dello sviluppo di approcci di tipo integrato, in grado di sfruttare contemporaneamente i benefici derivanti da schemi puramente stocastici e l'*output* dei modelli meteorologici.

Tutti i modelli descritti sono finalizzati alla previsione (deterministica o probabilistica) in tempo reale del superamento di valori critici di portata (o di tirante

idrico) al di sopra dei quali, in corrispondenza delle sezioni fluviali di interesse, possono verificarsi fenomeni di esondazione.

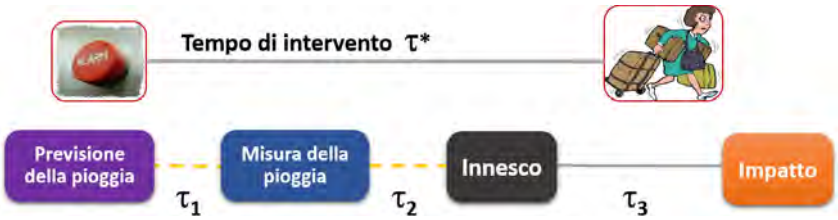

Fig. 1. Tempi caratteristici per un sistema di preannuncio.

2. Modelli di previsione delle piene

In letteratura sono presenti diverse tipologie di modelli per la previsione in tempo reale delle piene. In base alle dimensioni del bacino idrografico sotteso dalla sezione fluviale di interesse, è possibile effettuare una classificazione in:

1. *modelli di propagazione*;
2. *modelli Afflussi-Deflussi (A-D).*

I primi (Maione, 1999), relativi alla tipologia del Caso 1, sono particolarmente adatti per bacini di dimensione medio-grande, caratterizzati da valori elevati del tempo di corrivazione (dell'ordine di diverse ore o qualche giorno). Per questi bacini, la modellazione dell'*input* pluviometrico relativo a precipitazioni intense e di breve durata (al massimo qualche ora, ovvero una modesta percentuale del tempo di corrivazione) riveste un ruolo secondario rispetto al fenomeno della propagazione dell'onda di piena da sezioni di monte a quelle di valle. Nello specifico, i modelli di propagazione consentono la ricostruzione dell'onda di piena per una sezione di valle, sulla base delle informazioni idrometriche derivanti da sezioni posizionate a monte, e possono essere ulteriormente suddivisi in modelli idraulici e idrologici. I modelli idraulici si basano sulle equazioni differenziali di continuità e del moto, e si distinguono tra di loro per le semplificazioni assunte per le equazioni del moto vario (equazioni di De Saint Venant) e per gli schemi numerici adottati per la risoluzione delle stesse. I modelli idrologici, invece, assimilano il tronco fluviale in esame ad un invaso e studiano la propagazione dell'onda di piena associando all'equazione di continuità un'equazione di natura empirica, esprimente il legame tra le portate entrante ed uscente o soltanto uscente dal tronco e il volume in esso invasato: in tale categoria rientrano, ad esempio, i metodi di Muskingum, Muskingum-Cunge, e dell'invaso lineare.

I modelli A-D (Maione, 1999), invece, trovano applicazione soprattutto per le tipologie di Casi 2 e 3, ovvero per bacini di estensione più limitata, con valori del tempo di corrivazione non molto elevati (inferiori alle 8-12 ore) e per i quali, dunque, le piogge intense e di breve durata rivestono un ruolo importante nella formazione

dell'onda di piena nella sezione di chiusura. Per la previsione degli eventi di piena, i modelli A-D possono essere ulteriormente suddivisi in:

– *fisicamente basati*: simulano i singoli processi idrologici che si verificano all'interno del bacino tramite la risoluzioni di equazioni differenziali di continuità e del moto.

– *concettuali*: il bacino idrografico viene rappresentato tramite schemi di funzionamento semplici, quali canali e serbatoi (lineari e non), e combinazioni in serie e/o in parallelo degli stessi, in maniera tale da ottenere modelli più articolati.

– *a scatola chiusa (o black-box)*: non si utilizzano né equazioni differenziali, né schemi concettuali semplici, bensì si ricerca un operatore matematico (senza nessuna ipotesi fisica alla base) che leghi tra loro, nel miglior modo possibile, ingresso ed uscita del sistema, ovvero l'afflusso meteorico con la portata defluente alla sezione di chiusura del bacino idrografico.

Inoltre, i modelli A-D per la previsione in tempo reale delle piene possono essere ulteriormente classificati in:

– *concentrati*: l'*input* pluviometrico (variabile nel tempo) e i parametri del modello sono assunti spazialmente costanti all'interno del bacino idrografico;

– *distribuiti*: viene considerata la variazione spaziale dell'*input* pluviometrico e dei parametri del modello. Si effettua una discretizzazione del dominio spaziale in celle elementari, all'interno delle quali tali caratteristiche possono essere considerate uniformi.

In riferimento al Caso 2, ovvero di utilizzo delle sole misure di pioggia fino all'istante corrente t_0, si possono presentare due situazioni diverse:

Caso 2a: la disponibilità di dati storici simultanei di precipitazione e portata consentono una stima univoca (tramite tecniche di ottimizzazione) dei parametri del modello, e di conseguenza è possibile calcolare (per lo specifico evento pluviometrico in atto) l'idrogramma di piena corrispondente, e dunque il suo valore al colmo Q_{max} (Fig. 2a). Quest'ultimo andrà confrontato con il valore critico Q_{cr} (pari alla portata a piene rive o, qualora manchi tale informazione, alla stima del frattile di assegnato periodo di ritorno T), per prevedere l'eventuale esondazione nelle ore successive all'istante corrente t_0 per la sezione fluviale analizzata.

Caso 2b: qualora non sia possibile effettuare una taratura (per assenza, ad esempio, di dati storici di portata), l'utilizzo in tempo reale dello specifico modello A-D deve tener conto della *indeterminatezza parametrica*. I parametri, in tal caso, sono considerati come variabili casuali distribuite con leggi di probabilità e campi di variazione preliminarmente fissati. Successivamente, con tecniche di tipo Monte Carlo, viene generato un numero sufficientemente alto (1000-10.000) di set parametrici, e per ognuno di essi si calcola il corrispondente idrogramma di piena (Fig. 2b); infine, si calcola la probabilità p di superamento di Q_{cr}, stimata come rapporto tra il numero di idrogrammi i cui colmi superano il valore critico e il numero complessivo di idrogrammi generati.

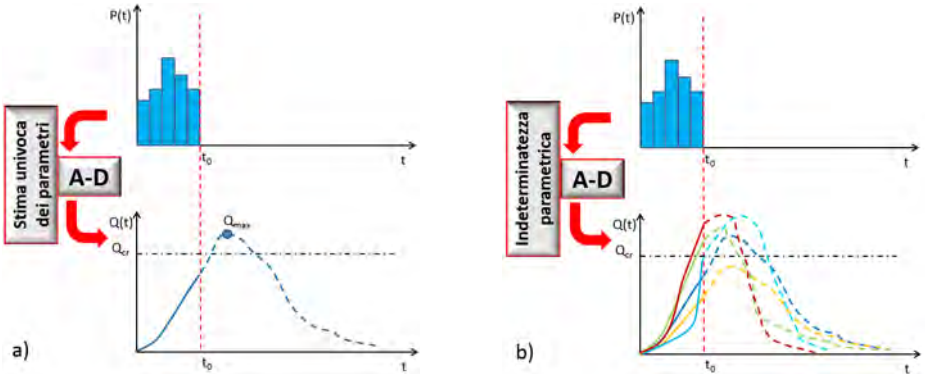

Fig. 2. Caso 2 – utilizzo delle sole piogge misurate: a) modello AD con parametri stimati univocamente; b) modello A-D con indeterminatezza parametrica.

Per quanto riguarda il Caso 3, le previsioni di pioggia, relative ad intervalli successivi all'istante corrente t_0 ed effettuate con le tipologie di modelli descritte nella Sezione 3, possono essere costituite da un unico andamento temporale (QPF, *Quantitative Precipitation Forecast*), o da un ensemble di traiettorie (PQPF, *Probabilistic Quantitative Precipitation Forecast*). Nel caso di PQPF, si possono avere:

Caso 3a: è possibile effettuare una taratura del modello A-D (come nel Caso 2a), e dall'ensemble di previsioni pluviometriche si utilizza una traiettoria rappresentativa (ad esempio quella media). Si ottiene un unico idrogramma di piena e, dunque, un valore univoco del colmo Q_{max}, da confrontare con il valore critico Q_{cr} (Fig. 3a);

Caso 3b: il modello A-D ha un set parametrico univoco (come il Caso 3a), e si considerano tutte le traiettorie pluviometriche dell'ensemble (Fig. 3b). Dall'istante t_0 si otterrà un insieme di andamenti dell'idrogramma di piena, e dunque un ensemble di valori al colmo, da cui sarà possibile calcolare la probabilità *p* di superamento del valore critico Q_{cr} in maniera analoga al Caso 2b;

Caso 3c: si ha indeterminatezza parametrica per il modello A-D e si utilizzano tutte le traiettorie di pioggia prevista (Fig. 3c). Di conseguenza, si ha un numero di idrogrammi di piena simulati pari al prodotto tra il numero di set parametrici generati con tecnica Monte Carlo e il numero di traiettorie dell'ensemble pluviometrico. Si calcola la probabilità di superamento di Q_{cr} come nei Casi 2b e 3b.

Un esempio di modello A-D che in fase di preannuncio tiene conto dell'indeterminatezza parametrica è il modello NASP (Nash Speditivo; Biondi & Versace, 2007), sviluppato presso il laboratorio CAMILab dell'Università della Calabria, che considera il metodo del *Curve Number* per la separazione della pioggia netta dalla pioggia persa, e l'IUH di Nash per la trasformazione afflussi-deflussi. Il modello è

caratterizzato da tre parametri (*CN*, *n*, *k*): *CN* si riferisce al modulo di infiltrazione, *n* è il numero di serbatoi lineari costituenti l'IUH di Nash, mentre *k* è la costante di esaurimento per tutti i serbatoi. Per *CN* è assunta una distribuzione probabilistica di tipo triangolare, mentre per *n* e *k* si considerano distribuzioni uniformi.

NASP utilizza in ingresso le piogge osservate (e anche quelle previste), e dunque in tempo reale fornisce la stima della probabilità di superamento di valori critici di portata al colmo, seguendo la metodologia descritta per i Casi 2b e 3c (Fig. 4).

3. Modelli di previsione delle piogge

La previsione delle altezze di precipitazione può essere condotta utilizzando modelli stocastici e/o modelli meteorologici.

I primi forniscono previsioni affidabili per piccole scale spaziali e temporali, che sono di interesse per le applicazioni idrologiche. In funzione della scala spaziale,

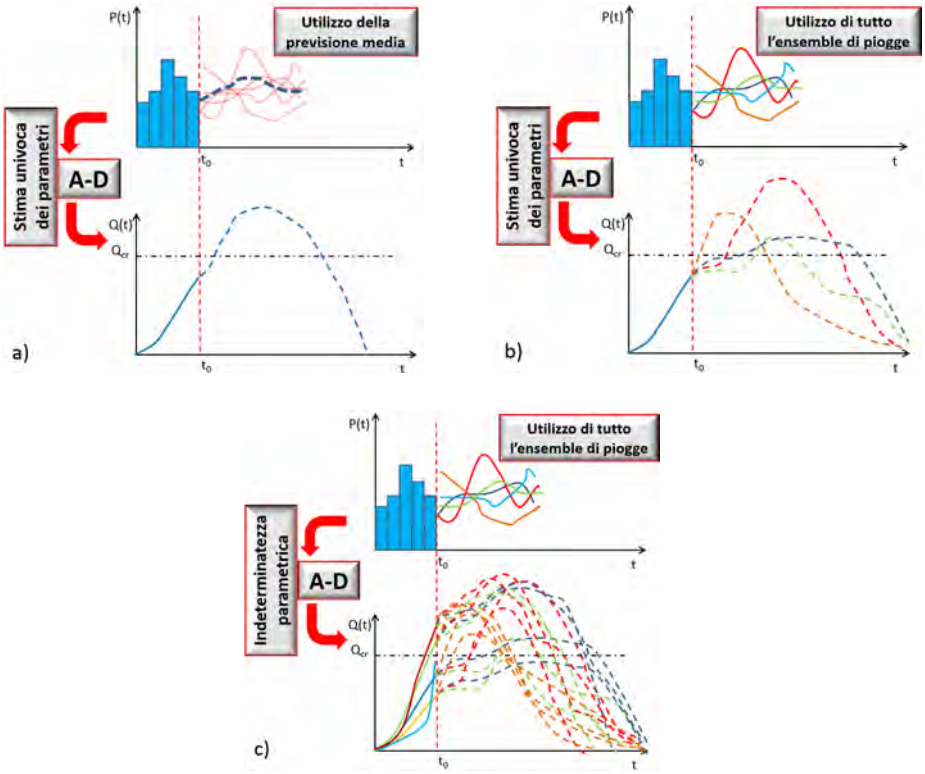

Fig. 3. Caso 3 – utilizzo anche delle piogge previste: a) modello A-D con parametri stimati univocamente e uso della traiettoria media di pioggia prevista; a) modello A-D con parametri stimati univocamente e uso di tutte le traiettorie di pioggia prevista; c) modello A-D con indeterminatezza parametrica e uso di tutte le traiettorie di pioggia prevista.

possono essere utilizzati modelli stocastici puntuali o spazio-temporali. I modelli puntuali sono adoperati per piccolo bacini, per i quali può essere assunta l'ipotesi di pioggia uniformemente distribuita spazialmente. In bacini idrografici di medio-grande dimensione, dove la variabilità spaziale della pioggia è non trascurabile, è necessario applicare modelli spazio-temporali. In generale, i modelli stocastici sono processi markoviani, ovvero dipendono solo dai dati di pioggia antecedente, e dunque, a parità di pioggia caduta, forniscono la stessa risposta, indipendentemente dal fatto che nelle ore successive si preveda bel tempo oppure si prevedano piogge intense. Appartengono alla categoria dei modelli stocastici i Processi Autoregressivi e le Reti Neurali Artificiali.

I modelli meteorologici sono basati sulla risoluzione, con metodi numerici, delle equazioni differenziali riguardanti la circolazione dell'atmosfera. Forniscono stime essenzialmente areali, che danno indicazioni circa i volumi complessivi che, nell'orizzonte temporale di previsione, potranno cadere sulla singola cella del dominio spaziale discretizzato per la risoluzione numerica delle equazioni fisiche, ma non sono in grado di discriminare in maniera affidabile i contributi sulle diverse aree contenute nella cella, ovvero alle piccole scale di interesse per le applicazioni idrologiche. Inoltre, tali modelli risultano poco adatti per effettuare previsioni in zone ad orografia complessa. L'informazione da essi fornita, infine, non contiene, se non in modo indiretto, attraverso le caratteristiche climatiche e morfologiche del sito, la memoria degli eventi del passato. Tuttavia, essi forniscono una previsione basata sull'analisi dei fenomeni atmosferici in corso e sull'evolvere nel tempo delle variabili di interesse meteorologico.

In generale, possono essere classificati in GCM (*Global Circulation Models*) e LAM (*Limited Area Models*). I GCM riescono a simulare la termodinamica dell'atmosfera su tutto il globo terrestre fino alla stratosfera, presentano una risoluzione spaziale di 40-80 km, una risoluzione temporale di 6-12 ore e restituiscono previsioni fino a 384 ore. I LAM simulano la termodinamica atmosferica di regioni più o meno grandi del pianeta; sono stati introdotti per aumentare la risoluzione spaziale della zona da investigare, ma non sostituiscono i GCM. Essi, infatti, oltre alle condizioni iniziali, hanno bisogno anche di condizioni al contorno, fornite direttamente dai modelli a circolazione globale. I LAM si suddividono a loro volta in modelli a media risoluzione (spaziale di 20-30 km e temporale di 6 ore) e ad alta risoluzione (spaziale di 1-10 km e temporale di 1-3 ore): entrambi presentano un orizzonte temporale di previsione fino a 48-72 ore. I modelli ad area limitata, infine, si suddividono in idrostatici e non idrostatici: i primi non tengono conto dell'accelerazione verticale, i secondi ne tengono conto, consentendo la simulazione di fenomeni quali perturbazioni non convettive, tornado, ecc.

Alla luce di queste schematiche considerazioni, la possibilità di integrare le informazioni prodotte dal predittore stocastico e quelle fornite dal previsore meteo appare attraente o, comunque, meritevole di interesse. Un approccio di questo tipo è stato sviluppato presso il Laboratorio CAMILab dell'Università della Calabria inte-

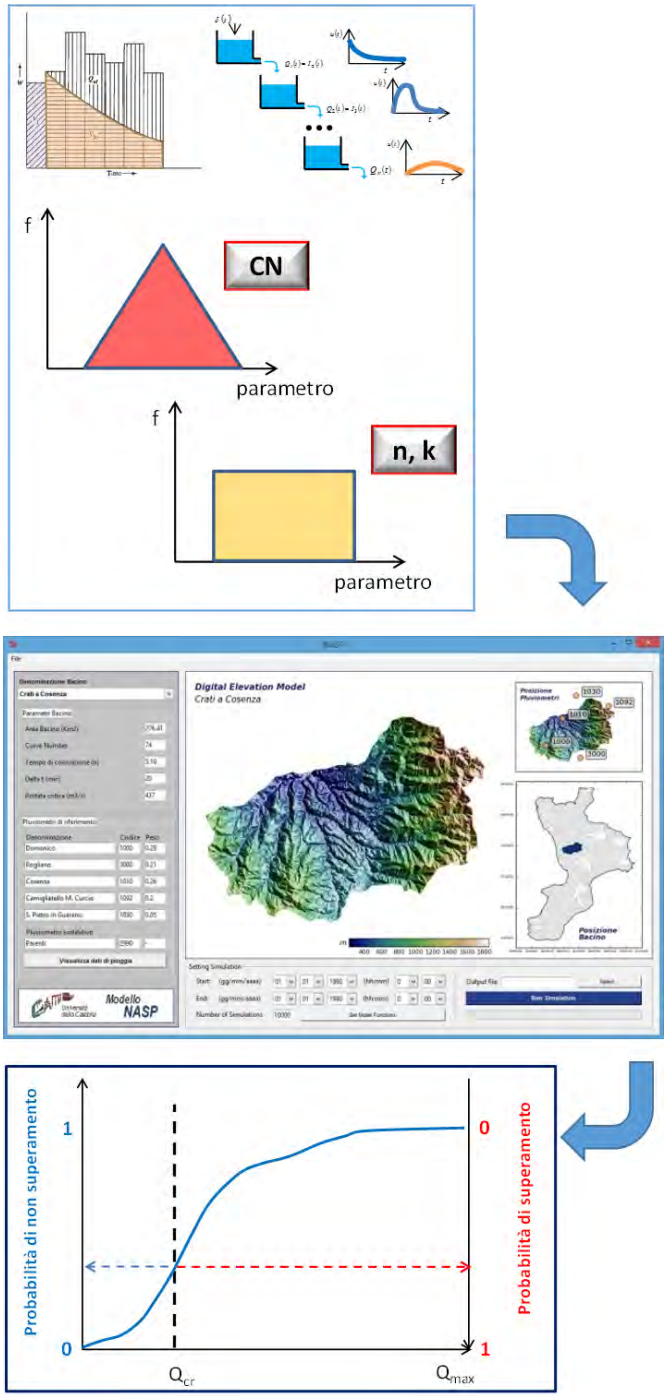

Fig. 4. Funzionamento del modello NASP.

grando in ottica bayesiana un predittore stocastico delle piogge puntuali rappresentato dal modello PRAISE (Sirangelo *et al.*, 2007) ed un previsore meteorologico LAM (il modello MM5; Anthes & Warner, 1978). Il modello integrato è indicato con l'acronimo PRAISE-ME (*Prediction of Rainfall Amount Inside Storm Events-Meteo*; De Luca & Versace, 2010; De Luca, 2013).

Tecniche di integrazione bayesiana finalizzate al *nowcasting* sono state utilizzate anche da altri autori (Seo & Smith, 1991; Moszkowicz, 2001; Todini, 2001) ma, più che altro, allo scopo di migliorare le stime radar utilizzando le misure pluviometriche al suolo.

L'applicazione ad alcuni eventi pluviometrici, che hanno interessato la città di Cosenza, ha consentito di evidenziare l'effetto che l'informazione meteo produce sulla distribuzione di probabilità delle piogge future, determinata a priori con un modello puramente stocastico. Il miglioramento è significativo soprattutto in quei casi in cui la pioggia antecedente è nulla (condizione per la quale un modello puramente stocastico restituisce ensemble con alta frequenza di precipitazione nulla), mentre la previsione meteo segnala valori non nulli nella cella di interesse contenente il pluviometro per le ore successive.

A titolo di esempio, in Figura 5 è illustrata l'applicazione relativa all'evento del 6 Dicembre 2002. I valori di pioggia oraria, misurati successivamente nell'intervallo di previsione, sono stati confrontati con i percentili 90%, 95% e 97.5% delle distribuzioni di probabilità, stimate per ogni ora dai modelli PRAISE e PRAISE-ME. Tra le ore 4:00 e le ore 12:00 il pluviometro di Cosenza ha registrato pioggia nulla, mentre nell'intervallo di previsione, tra le 12:00 e le 18:00, il modello meteo MM5 prevede pioggia.

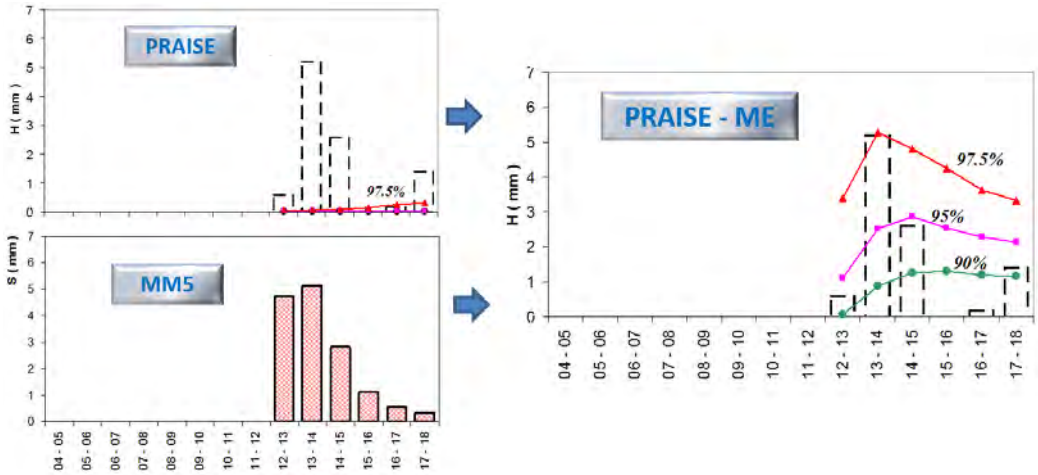

Fig. 5. Pluviometro di Cosenza: applicazioni PRAISE e PRAISE-ME per l'evento del 6 dicembre 2002.

Dalla Figura 5 si evince chiaramente la capacità di PRAISE-ME di riprodurre, rispetto a PRAISE, cioè un predittore puramente stocastico, la pioggia futura all'interno di intervalli di confidenza.

4. Considerazioni finali

La previsione delle piene che possono generare esondazione è un tema di rilevanza strategica, perché consente di ridurre in modo consistente i danni alle persone e di attenuare, in molti casi, anche i danni ai beni. I modelli proposti dalla letteratura sono molto numerosi e non è facile orientarsi. In questo lavoro l'attenzione è stata posta su uno degli elementi che si ritengono più rilevanti: la scelta della tipologia di modello (o di modelli) da utilizzare in un caso specifico.

È evidente che estendendo la catena di modelli (previsione delle piogge, trasformazione afflussi-deflussi, propagazione in alveo) aumenta l'orizzonte temporale di riferimento ma anche l'incertezza della stima. Pertanto è necessario commisurare la lunghezza della catena modellistica al caso reale cercando di contenerla al minimo, tenendo conto della necessità di disporre di un anticipo di previsioni accettabili.

BIBLIOGRAFIA

Anthes R.A., T.J. Warner, 1978. *Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies*. Monthly Weather Review, 108, 1045-1078.

Biondi D., P. Versace, 2007. *Peak flow estimation under parameter uncertainty in a real time flood warning system for ungauged basins*. In: *Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management*, Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007, Perugia, July 2007, IAHS Publ. 313, pp. 425-435.

Capparelli G., P. Versace, 2011. *FLaIR and SUSHI: two mathematical models for early warning of landslides induced by rainfall*. Landslides, 8, 67-79.

De Luca D.L., 2013. *Rainfall Nowcasting Models for Early Warning Systems*. Series Ed. T.W.S. Wong, Nova Publishers. ISBN 978-1-62257-805-4.

De Luca D. L., P. Versace, 2010. *Stochastic models for rainfall nowcasting. Proceedings of STAHY 2010*. International Workshop on Advances in Statistical Hydrology, Taormina (Italy), 23-25 May 2010, published on line http://www.risorseidriche.dica.unict.it/Sito_STAHY2010_web/proceedings.htm).

Maione U., 1999. *Le Piene Fluviali*. La Goliardica Pavese. ISBN 88-7830-219-8, 214 pp.

Moszkowicz S., 2001. *Bayesian approach for merging radar and gauge rainfall data and its application for model rainfall verification*. Working Group 2, COST-717, Dublin 2001, http://www.smhi.se/cost717/doc/WDD_02_ 200110_1.pdf

Rabufetti D., S. Barbero, 2005. *Operational hydro-meteorological warning and real-time flood forecasting: the Piemonte Region case study*. Hydrology and Earth System Sciences, 9 (4), 457-466.

Seo D.J., J. A. Smith, 1991. *Rainfall estimation using rain gauges and radar - A Bayesian approach: 1. Derivation of estimators*. Stochastic Hydrology and Hydraulics, 5, 17-29.

Sirangelo B., P. Versace, D.L. De Luca, 2007. *Rainfall nowcasting by at site stochastic model PRAISE*. Hydrology and Earth System Sciences, 11, 1341-1351.

Thielen J., J. Bartholmes, M. H. Ramos, A. de Roo, 2009. *The European Flood Alert System – Part I: Concept and development*. Hydrology and Earth System Sciences, 13, 125-140.

Todini E., 2001. *A Bayesan technique for conditioning radar precipitation estimates to raingauge measurements*. Hydrology and Earth System Sciences, 5 (2), 187-189.