



La difesa dalle alluvioni nel territorio alpino

Report conclusivo del progetto FLORA



FLOOD ESTIMATION IN COMPLEX OROGRAPHIC AREA FOR RISK MITIGATION IN ALPINE SPACE

La difesa dalle alluvioni nel territorio alpino

Report conclusivo del progetto FLORA

RESPONSABILE DEL PROGETTO

Secondo Barbero - Arpa Piemonte, Dipartimento Sistemi Previsionali

AUTORI

PREVISIONE DELLE PRECIPITAZIONI AD ALTISSIMA RISOLUZIONE TRAMITE TECNICHE DI ASSIMILAZIONE DELLE OSSERVAZIONI

Massimo Milelli, Elena Oberto, Daniele Cane, Luca Tomassone - Arpa Piemonte, Dipartimento Sistemi Previsionali

Naima Vela, Marco Galli, Claudio Cassardo - Università di Torino

Marco Gaia - MeteoSvizzera

STIMA DEI CAMPI DI PRECIPITAZIONE DA RADAR MEDIANTE VALIDAZIONE CON DATI PROVENIENTI DALLA RETE PLUVIOMETRICA

Pierluigi Claps, Francesco Laio, Paola Allamano, Enrico Gallo, Alessandro Masoero - Politecnico di Torino,

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Secondo Barbero, Roberto Cremonini, Renzo Bechini - Arpa Piemonte, Dipartimento Sistemi Previsionali

PREVISIONE DELLE PIENE IMPROVISE NEI PICCOLI BACINI

Andrea Salvetti - Cantone Ticino, Dipartimento del Territorio, Ufficio dei corsi d'acqua

Massimiliano Zappa e Käthi Liechti, Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL, Birmendorf

VALUTAZIONE PROBABILISTICA DELLE PORTATE AL COLMO DI PIENA NEL SETTORE OCCIDENTALE DEL BACINO DEL PO

Francesco Laio, Pierluigi Claps, Daniele Ganora - Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Secondo Barbero, Mariella Graziadei, Milena Zaccagnino - Arpa Piemonte, Dipartimento Sistemi Previsionali

DATI CARATTERISTICI DEI CORSI D'ACQUA LOMBARDI

Michele Russo, Matteo Cislighi, Angela Sulis, Roberto Serra - Arpa Lombardia,

Settore Tutela delle Risorse e Rischi Naturali, Servizio Idrografico

FOTOGRAFIE

Archivio Arpa Piemonte

Archivio Arpa Lombardia

COORDINAMENTO EDITORIALE

Elisa Bianchi, Roberta Meotto - Arpa Piemonte, Comunicazione istituzionale

PROGETTO GRAFICO

Pomilio Blumm Srl, Pescara

Finito di stampare nel mese di aprile 2012 presso la tipografia Grafica Reventino Srl, Decollatura (CZ)



Stampato su carta patinata certificata FSC® recycled credit, con un contenuto di fibre riciclate del 100%

ISBN 978-88-7479-110-1



Copyright©2012, Arpa Piemonte
Via Pio VII, 9 - 10135 Torino - Italia
www.arpa.piemonte.it

Progetto cofinanziato dal FESR «Fondo europeo di sviluppo regionale»
«Le opportunità non hanno confini»



Indice

Introduzione.	5
1. Previsione delle precipitazioni ad altissima risoluzione tramite tecniche di assimilazione delle osservazioni	7
2. Stima dei campi di precipitazione da radar mediante validazione con dati provenienti dalla rete pluviometrica.	37
3. Previsione delle piene improvvise nei piccoli bacini	63
4. Valutazione probabilistica delle portate al colmo di piena nel settore occidentale del bacino del Po	89
5. Dati caratteristici dei corsi d'acqua lombardi.	103

Introduzione



Il rischio d'inondazione colpisce fortemente le regioni alpine che sono caratterizzate da bacini a forte pendenza e da piogge intense in grado di generare piene improvvise particolarmente pericolose. Sebbene le alluvioni siano fenomeni naturali impossibili da prevenire, tuttavia è possibile ridurre vittime, danni ambientali ed economici, attraverso un'adeguata valutazione e gestione dei rischi.

I cambiamenti climatici in atto ed alcune attività umane, come l'estensione delle aree urbanizzate e la riduzione della naturale capacità di ritenzione idrica, contribuiscono via via ad aumentare la probabilità di accadimento e aggravano gli impatti negativi delle alluvioni. Di qui la necessità di adeguare al nuovo contesto che si va delineando le misure di difesa non strutturali per ridurre i rischi per la salute e la vita umana, l'ambiente e lo sviluppo economico.

Facendo tesoro delle attività di collaborazione nella gestione dei rischi naturali in ambiente alpino, che proseguono con continuità da oltre 15 anni nell'ambito dei programmi comunitari di cooperazione transfrontaliera, Arpa Piemonte ha proposto uno specifico progetto sulle tematiche del rischio idraulico denominato FLORA in partenariato con Arpa Lombardia e con il Canton Ticino.

Il progetto FLORA (Flood estimation in complex Orographic area for Risk mitigation in Alpine space) ha avuto come obiettivo il miglioramento di strumenti operativi per la difesa dalle alluvioni in un'area ad orografia complessa come quella rappresentata dalle valli alpine italo-svizzere e l'aumento del livello di protezione dalle alluvioni quale strumento di adattamento e mitigazione degli effetti indotti sul territorio dai cambiamenti climatici. Questi obiettivi sono stati perseguiti anche attraverso la predisposizione di procedure di analisi e gestione del rischio e delle emergenze.

Le tematiche affrontate nel progetto FLORA riguardano:

- il miglioramento della stima della precipitazione alla piccola scala spazio-temporale, indispensabile per la valutazione delle piene dei bacini montani, sia in termini di previsione (modelli meteorologici) sia di osservazione (radar);
- la sperimentazione di strumenti di nowcasting delle piene improvvise su piccoli bacini, attraverso l'uso di prodotti innovativi come i "radar ensemble" per alimentare i modelli idrologici di previsione in tempo reale;
- l'aggiornamento delle valutazioni probabilistiche delle portate di piena a scala regionale quale indispensabile strumento a base della valutazione del rischio di inondazione e più in generale per un appropriato dimensionamento delle opere idrauliche connesse al corso d'acqua.

La presente pubblicazione, che sintetizza i risultati conseguiti nel progetto, consta di 5 capitoli, in ognuno dei quali sono stati affrontati i seguenti argomenti:

- 1) realizzazione di nuove metodologie di miglioramento della previsione di precipitazione ad altissima risoluzione dei modelli meteorologici ad area limitata utilizzati per l'emissione delle allerte di protezione civile attraverso l'assimilazione di dati osservati dalle reti al suolo ad alta densità disponibili in territorio italo-svizzero;
- 2) integrazione di misure radar meteorologiche per la stima dei campi di precipitazione mediante validazione con dati provenienti dalla rete pluviometrica e creazione di una mappa dell'incertezza associata alla misura;
- 3) previsione delle piene improvvise nei piccoli bacini finalizzati al nowcasting idrologico a supporto della gestione delle emergenze, tramite modelli idrologici alimentati da campi di precipitazioni ottenuti da set di osservazioni radar opportunamente generate (radar ensemble);
- 4) aggiornamento del quadro conoscitivo delle piene nel settore occidentale del bacino del Po e sviluppo di metodi per il miglioramento della stima delle portate di progetto e la valutazione dell'incertezza;
- 5) dati caratteristici dei corsi d'acqua lombardi e relativa stima probabilistica regionale delle portate di piena.

1

**Previsione delle precipitazioni
ad altissima risoluzione
tramite tecniche di assimilazione
delle osservazioni**



OBIETTIVI

La previsione quantitativa della precipitazione in aree ad orografia complessa (QPF) è una delle motivazioni più importanti per l'utilizzo di un modello numerico di previsione. Purtroppo esso è anche fra i parametri più difficili da prevedere quantitativamente per il modello stesso, sia per quanto riguarda l'intensità, sia per quanto riguarda la localizzazione. Tale difficoltà aumenta ulteriormente in caso di precipitazione convettiva, data l'intrinseca incertezza nella risoluzione di un evento con una limitata estensione spazio-temporale. I modelli ad area limitata operativi attualmente hanno una risoluzione nominale (passo griglia) di poco inferiore ai 10 km circa, ma la loro risoluzione effettiva, ovvero la scala alla quale i fenomeni vengono effettivamente descritti, è maggiore. Diventa quindi necessario diminuire il passo griglia del modello per cercare di avere una descrizione più realistica dell'orografia e potere arrivare alla definizione dei fenomeni più locali. A tale scopo si vuole utilizzare nel progetto un modello che abbia un passo griglia di circa 3 km.

Tali modelli sono sviluppati all'interno del gruppo COSMO (COntortium for Small-scale MOdelling, www.cosmo-model.org) e sono operativi presso il Centro Funzionale di Arpa Piemonte. Tale consorzio, fondato nell'ottobre 1998, comprende al suo interno i seguenti servizi meteorologici nazionali:

- DWD (Deutscher Wetterdienst), Offenbach, Germania;
- MeteoSvizzera, Zurigo, Svizzera;
- USAM (Ufficio Generale Spazio Aereo e Meteorologia), Roma, Italia;
- HNMS (Hellenic National Meteorological Service), Atene, Grecia;
- IMGW (Institute of Meteorology and Water Management), Varsavia, Polonia;
- NMA (National Meteorological Administration), Bucarest, Romania;
- RHM (Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring), Mosca, Russia.

In più ne fanno parte i seguenti servizi regionali (civili e militari):

- Arpa Piemonte, Torino, Italia;
- ARPA Emilia Romagna-SIMC, Bologna, Italia;
- CIRA (Centro Italiano Ricerche Aerospaziali), Capua, Italia;
- Amt für GeoInformationswesen der Bundeswehr, Germania.

Scopo del consorzio è sviluppare, mantenere e migliorare il modello sia per le applicazioni operative sia per quelle di ricerca. Al momento sono attivi sei gruppi che coprono le seguenti aree di lavoro:

- assimilazione dati;
- aspetti numerici;
- aspetti fisici in atmosfera;
- aspetti fisici al suolo;
- applicazioni ed interpretazioni (post-elaborazioni);
- verifica e casi studio;
- implementazioni e versione di riferimento;
- predicibilità e metodi di ensemble.

Nel contesto del progetto FLORA si è deciso di concentrare il lavoro sui modelli meteorologici COSMO-I7, COSMO-I2 e COSMO-7. Quest'ultimo è la versione operativa presso MeteoSvizzera del modello del consorzio COSMO. L'obiettivo principale diventa quindi il miglioramento della QPF attraverso tre vie:

1. la conoscenza approfondita del modello, ovvero sapere come si comporta il modello stesso nella previsione di eventi di precipitazione rilevanti e sapere quali sono i suoi punti deboli o di forza tramite un'accurata verifica della QPF rispetto ad una rete osservativa estremamente fitta;
2. il miglioramento del modello stesso tramite studi approfonditi sulla sua struttura interna, in particolare per quanto riguarda l'assimilazione dei dati osservati che è uno dei punti cruciali della struttura di un modello numerico di previsione;
3. l'elaborazione di metodi di post-processing che correggano in modo ragionato le previsioni dirette dei modelli.

Il punto di partenza di qualunque attività però è la disponibilità di una rete osservativa adeguata. Ecco perché il primo passo consiste nel raccogliere e condividere i dati osservati afferenti ai partner del progetto. Solo successivamente si può procedere ad una verifica del comportamento dei modelli su di un periodo sufficientemente lungo dal punto di vista statistico e ad uno studio sul miglioramento della loro qualità.

1. RACCOLTA DI DATI OSSERVATI DELLE RETI NON-GTS AFFERENTI AD ARPA PIEMONTE E METEOSVIZZERA

La creazione di un dataset che consenta la migliore comprensione dei fenomeni di precipitazione intensa sulla regione transfrontaliera caratterizzata da orografia complessa è fondamentale per il progetto. La disponibilità di dati osservati, il loro trattamento ai fini dello studio dei fenomeni atmosferici previsti da un modello numerico e la loro introduzione nella definizione della condizione iniziale, sono la base necessaria per il miglioramento della QPF.

In dettaglio, Arpa Piemonte ha stretto degli accordi con MeteoSvizzera e ha creato un account su un proprio sito ftp nel quale, dall'inizio del progetto, vengono messi a disposizione quotidianamente sia dati orari di temperatura, vento, umidità e pioggia delle stazioni del Canton Ticino, sia dati orari di pioggia delle stazioni piemontesi al confine con la Svizzera. Sono stati inoltre scambiati i rispettivi dati storici per una migliore comprensione del clima di tutta la regione.

L'inserimento dei dati di MeteoSvizzera nel database di Arpa Piemonte consente una maggiore fruibilità dei dati per la loro elaborazione.

Nella Tabella 1.1 sono elencate le stazioni piemontesi e svizzere coinvolte nello scambio dati ed i loro rispettivi sensori di misura.

LOCALITÀ	DENOMINAZIONE	SENSORI
TICINO	STABIO	T, B, I, P, N, A
TICINO	ROBIEI	T, B, I, P, N, A
TICINO	PIOTTA	T, B, I, P, N, A
TICINO	LUGANO	T, B, I, P, N, A
TICINO	LOCARNO-MONTI	T, B, I, P, N, A
TICINO	LOCARNO-MAGADINO	T, B, I, P, N, A
TICINO	COMPROVASCO	T, B, I, P, N, A
TICINO	ULRICHEN	T, P
TICINO	VISP	T, P
TICINO	ZERMATT	T, P
TICINO	CIMETTA	T, B, I, P, A
TICINO	CAMEDO	P
TICINO	LUZZONE	P
TICINO	BEDRETTO	P
TICINO	JUNGFRAUJOCH	T, B, I, P, A
TICINO	MONTANA	T, B, I, P, A
TICINO	POSCHIAVO/ROBBIA	T, B, I, P, A
TICINO	TICINO A BELLINZONA	H
TICINO	MAGGIA A SOLDUNO	H
TICINO	LAGO VERBANO A TENERO	H
TICINO	GUETCH OB ANDERMATT	T, P
GRIGIONI	SAN BERNARDINO	T, B, I, P, N, A
VALLESE	SION	T, B, I, P, A
VALLESE	COL DU GRAN SANBERNARD	T, B, I, P, A
PIEMONTE	PASSO DEL MORO	P
PIEMONTE	FORMAZZA	P
PIEMONTE	CEPPO MORELLI	P
PIEMONTE	VARZO	P
PIEMONTE	DOMODOSSOLA	P
PIEMONTE	DRUOGNO	P
PIEMONTE	ALPE DEVERO	P
PIEMONTE	PIZZANCO	P
PIEMONTE	ALPE CHEGGIO	P
PIEMONTE	FOMARCO	P
PIEMONTE	PALLANZA	P
PIEMONTE	SAMBUGHETTO	P
PIEMONTE	MOTTAC	P
PIEMONTE	MOTTARONE - BAITA CAI	P
PIEMONTE	CANDOGLIA TOCE	P
PIEMONTE	MONTE CARZA	P
PIEMONTE	CICOGNA	P
PIEMONTE	CANNOBIO	P
PIEMONTE	FORMAZZA BRUGGI	P
PIEMONTE	SOMERARO	P
PIEMONTE	OMEGNA LAGO D'ORTA	P
PIEMONTE	MONTE MESMA	P

LOCALITÀ	DENOMINAZIONE	SENSORI
PIEMONTE	TRASQUERA	P
PIEMONTE	NEBBIUNO	P
PIEMONTE	PREMIA	P
PIEMONTE	CESARA	P
PIEMONTE	ARVOGNO	P
PIEMONTE	MACUGNAGA RIFUGIO ZAMBONI	P
PIEMONTE	MOTTARONE	P
PIEMONTE	ALPE VEGLIA	P
PIEMONTE	LAGO PAIONE	P
PIEMONTE	MACUGNAGA PECETTO	P
PIEMONTE	LARECCHIO	P
PIEMONTE	ANZINO	P
PIEMONTE	CURSOLO	P
PIEMONTE	CRODO	P
PIEMONTE	BOCCHETTA DELLE PISSE	P
PIEMONTE	CARCOFORO	P
PIEMONTE	PRAY SESSERA	P
PIEMONTE	PIEDICAVALLO	P
PIEMONTE	CAVALLARIA	P
PIEMONTE	CELLIO	P
PIEMONTE	GRAGLIA	P
PIEMONTE	BIELMONTE	P
PIEMONTE	RIMA	P
PIEMONTE	SABBIA	P
PIEMONTE	FOBELLO	P
PIEMONTE	ANDRATE PINALBA	P
PIEMONTE	PETTINENGO	P
PIEMONTE	BOCCIOLETO	P
PIEMONTE	BIELLA	P
PIEMONTE	BORGOSIESIA SESIA	P
PIEMONTE	CAMPARIENT	P
PIEMONTE	ALAGNA	P
PIEMONTE	TRAVERSELLA	P
PIEMONTE	TRIVERO	P
PIEMONTE	RASSA	P
PIEMONTE	BORGOFRANCO D'IVREA	P
PIEMONTE	OROPA	P
PIEMONTE	VARALLO	P
PIEMONTE	MEUGLIANO	P

Tabella 1.1 - Elenco delle stazioni condivise tra Arpa Piemonte e MeteoSvizzera. I sensori sono termometro (T), Barometro (B), Igrometro (I), Pluviometro (P), Anemometro (A), Nivometro (N), Idrometro (H).

2. VERIFICA DELLA QPF DEGLI ATTUALI MODELLI PREVISIONALI AD ALTISSIMA RISOLUZIONE IN USO OPERATIVAMENTE PRESSO ARPA PIEMONTE E METEOSVIZZERA

Uno dei principali aspetti per lo sviluppo di un modello è la verifica dell'affidabilità delle previsioni del modello stesso. Proprio la verifica risulta essere quindi uno degli aspetti di maggior importanza nelle attività di un centro meteorologico, poiché permette di conoscere il comportamento del modello nelle diverse situazioni, evidenziarne le caratteristiche sistematiche, valutarne l'affidabilità, sia in termini medi sia estremi, sia su lunghi periodi, sia nella situazione corrente. Un buon sistema di verifica permette non solo di capire dove intervenire per apportare dei miglioramenti, ma soprattutto permette di utilizzare al meglio i campi previsti dal modello in funzione dell'obiettivo previsionale. Al contrario di altri campi meteorologici, la precipitazione ha una componente sia on/off che quantitativa. Questo significa che occorre valutare l'abilità del modello sia nel predire un evento precipitativo che nel stimarne la quantità. Per la validazione del campo di precipitazione si utilizzano principalmente metodi statistici che si basano sul calcolo di indici derivanti dalla tabella di contingenza: tabella a doppia entrata in cui, fissata una determinata soglia di precipitazione accumulata in un certo intervallo temporale, si vanno a contare il numero di casi previsti e osservati che superano tale soglia (Tabella 1.2).

		Previsti	
		NO	SI
Osservati	NO	A	B
	SI	C	D

Tabella 1.2 - Tabella di contingenza dove:

- A è il numero di casi in cui l'evento (ovvero il valore di precipitazione supera la determinata soglia) non è stato né previsto né osservato;
- B è il numero di casi in cui l'evento è stato previsto ma non osservato: un falso allarme;
- C è il numero di casi in cui l'evento osservato non è stato previsto: un mancato allarme;
- D è il numero di casi in cui l'evento osservato è stato previsto: una previsione corretta.

Vengono calcolati gli indici statistici sulle aree di allertamento sia sul lungo periodo per valutare l'affidabilità media del modello, sia stagionalmente per valutare l'andamento in funzione delle caratteristiche climatiche e fenomenologiche diverse e delle modifiche che il modello, in continua evoluzione, subisce periodicamente. Tali indici sono calcolati anche in riferimento a macro aree omogenee dal punto di vista meteorologico e climatologico oppure morfologico, visto il ruolo che gioca l'orografia del nostro territorio nello sviluppo e nell'intensificazione dei fenomeni precipitativi. Nella tabella seguente (Tabella 1.3) vengono elencate le definizioni degli indici più utilizzati comunemente. Per ulteriori approfondimenti circa gli indici standard si può far riferimento a Stanski et al. (1989), Wilks (1995), Ebert and McBride (1997), Shaeffer (1990).

Queste tecniche di validazione vengono abitualmente applicate per la verifica della QPF. Il sistema di allertamento, infatti, è basato sulla previsione della QPF sui bacini meteo-idrologici in termini di valor medio e massimo atteso. Quindi lo scopo principale della verifica è stimare il miglioramento del modello in termini di sovra/sottostima, accuratezza nello spazio e nella temporizzazione e capacità di prevedere correttamente precipitazioni forti così come scarse.

Per quel che concerne la verifica della precipitazione mediante l'uso della rete al suolo di dati osservati non-GTS ad alta risoluzione, vengono analizzate le differenti performance sul territorio italiano delle due versioni operative del COSMO-Model a 7 km di risoluzione orizzontale: COSMO-7 (versione svizzera sviluppata da MeteoSvizzera) e COSMO-I7 (versione italiana sviluppata da ARPA-SIMC, USAM e Arpa Piemonte). Viene inoltre considerata la versione italiana del modello a 2.8 km di risoluzione orizzontale COSMO-I2.

Indice	Range	Miglior valore	Significato	Caratteristiche
$BIAS \equiv \frac{B}{C} \frac{D}{D}$	0, ∞]	1	Indica se la previsione ha la tendenza alla sottostima (BIAS<1) o alla sovrastima (BIAS>1)	Non considera l'acutezza della previsione
$POD \equiv \frac{D}{C} \frac{D}{D}$	0,1]	1	Indica la percentuale di eventi correttamente previsti (sensibilità)	Ignora i falsi allarmi. Sensibile alla frequenza climatologica degli eventi
$ETS \equiv \frac{\tilde{D} \text{ hits}_{rand\ om}}{(B \ C \ D) \text{ hits}_{rand\ om}}$ dove $\text{hits}_{rand\ om} \equiv \frac{(B \ D)(C \ D)}{(A \ B \ C \ D)}$	1/3, 1]	1	è l'indice TS corretto della dipendenza "climatica" eliminando i successi dovuti solo al caso; per esempio, è più facile prevedere una precipitazione in un periodo piovoso che in uno secco (Schaefer, J.T. 1990)	Non distinguere la sorgente di errore previsionale; può dipendere dalla distribuzione di pioggia / no pioggia
$FAR \equiv \frac{B}{B \ D}$	0,1	0	Rappresenta il numero di falsi allarmi	Da esaminare insieme a HRR

Tabella 1.3 - Definizione dei principali indici statistici

Il dataset utilizzato (circa 530 stazioni) è un network ad alta risoluzione di pluviometri distribuiti sulle regioni del nordovest italiano con l'aggiunta del Cantone Ticino: oltre ai dati di Arpa Piemonte vengono utilizzate le reti pluviometriche delle Regioni Valle d'Aosta, Lombardia e Liguria afferenti al sistema nazionale dei Centri Funzionali di Protezione Civile. Per ottenere risultati affidabili statisticamente si può mettere insieme nel tempo e/o nello spazio un elevato numero di coppie osservato/previsto, anche se si corre il pericolo di mascherare le differenze nelle performance della previsione quando i dati non sono omogenei. Filtrare poi i campioni in sottoinsiemi quasi omogenei (in stagioni, in zone geografiche contigue, in intensità dei valori osservati, ecc.) aiuta ad evidenziare il comportamento della previsione durante un particolare regime (ad esempio le performance nella stagione più piovosa o nella zona alpina piuttosto che in pianura). Quando si dividono i dati in esame in sottoinsiemi, questi devono contenere un numero sufficiente di campioni per dare risultati statisticamente significativi.

Nelle figure 1.1 e 1.2 vengono mostrati gli indici statistici stagionali da dicembre 2007 a maggio 2011 per le soglie di 2mm/24h e 20mm/24h rispettivamente. I risultati si possono riassumere nel modo seguente:

- soglia bassa:
 - o COSMO-I7 ha picchi di sovrastima in estate con indici peggiori;
 - o marcata sottostima di COSMO-I2 e COSMO-7 fino al 2010, poi miglioramento;
 - o gli indici crollano nell'estate 2009;
- soglia alta:
 - o marcata sottostima di COSMO-7 e COSMO-I2 fino al 2010, poi miglioramento;
 - o COSMO-I7 ha un buon BIAS;
 - o gli indici crollano nell'estate 2009;
 - o nelle ultime stagioni ETS migliora leggermente specialmente per COSMO-I7;
 - o nelle ultime stagioni POD si assesta intorno al 60% ed è migliore per COSMO-I7.

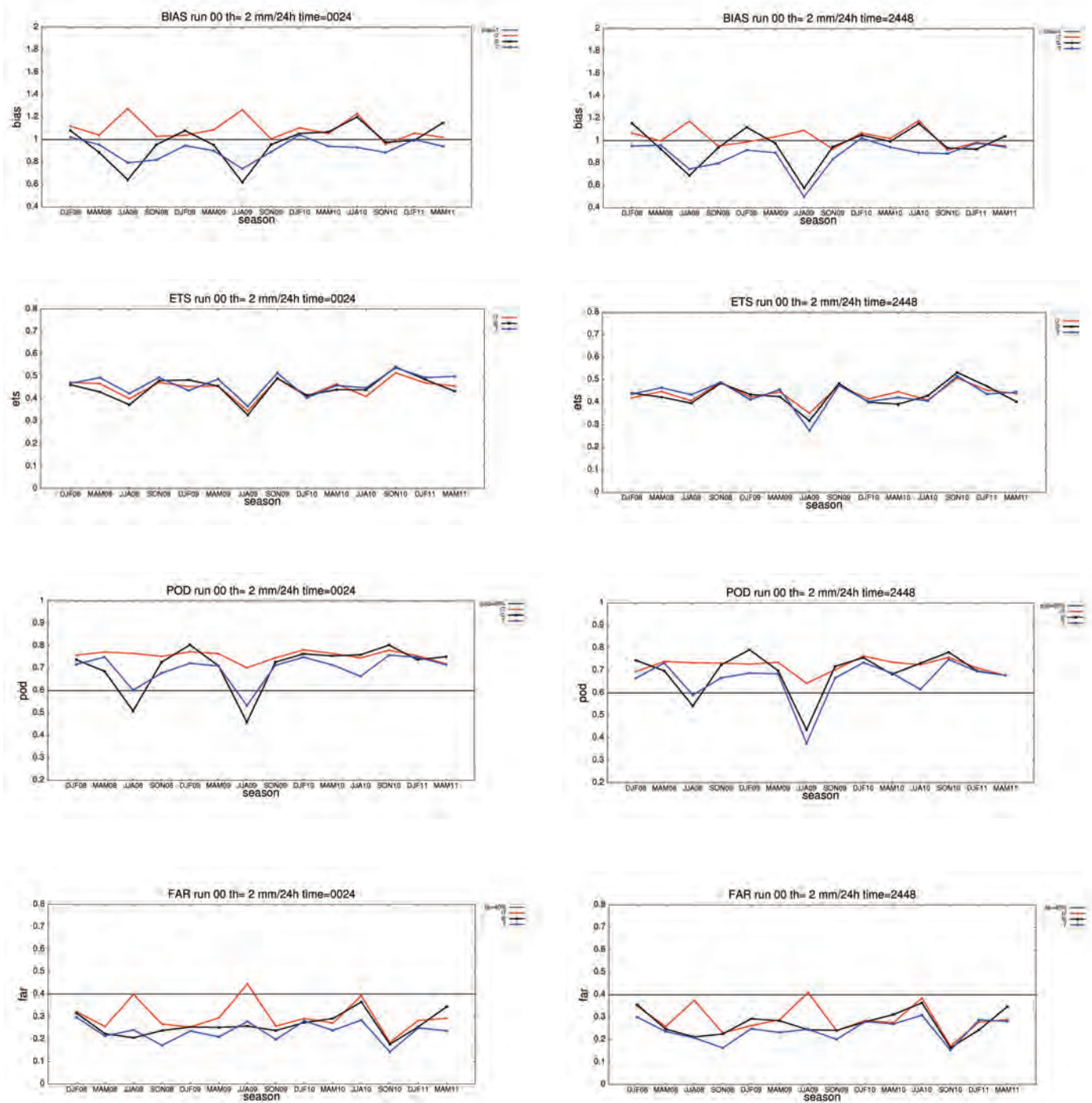


Figura 1.1 - Indici statistici BIAS, ETS, POD e FAR per la soglia di 2mm/24h. A sinistra le prime 24h e a destra le seconde 24h. COSMO-17 in rosso, COSMO-12 in nero e COSMO-7 in blu.

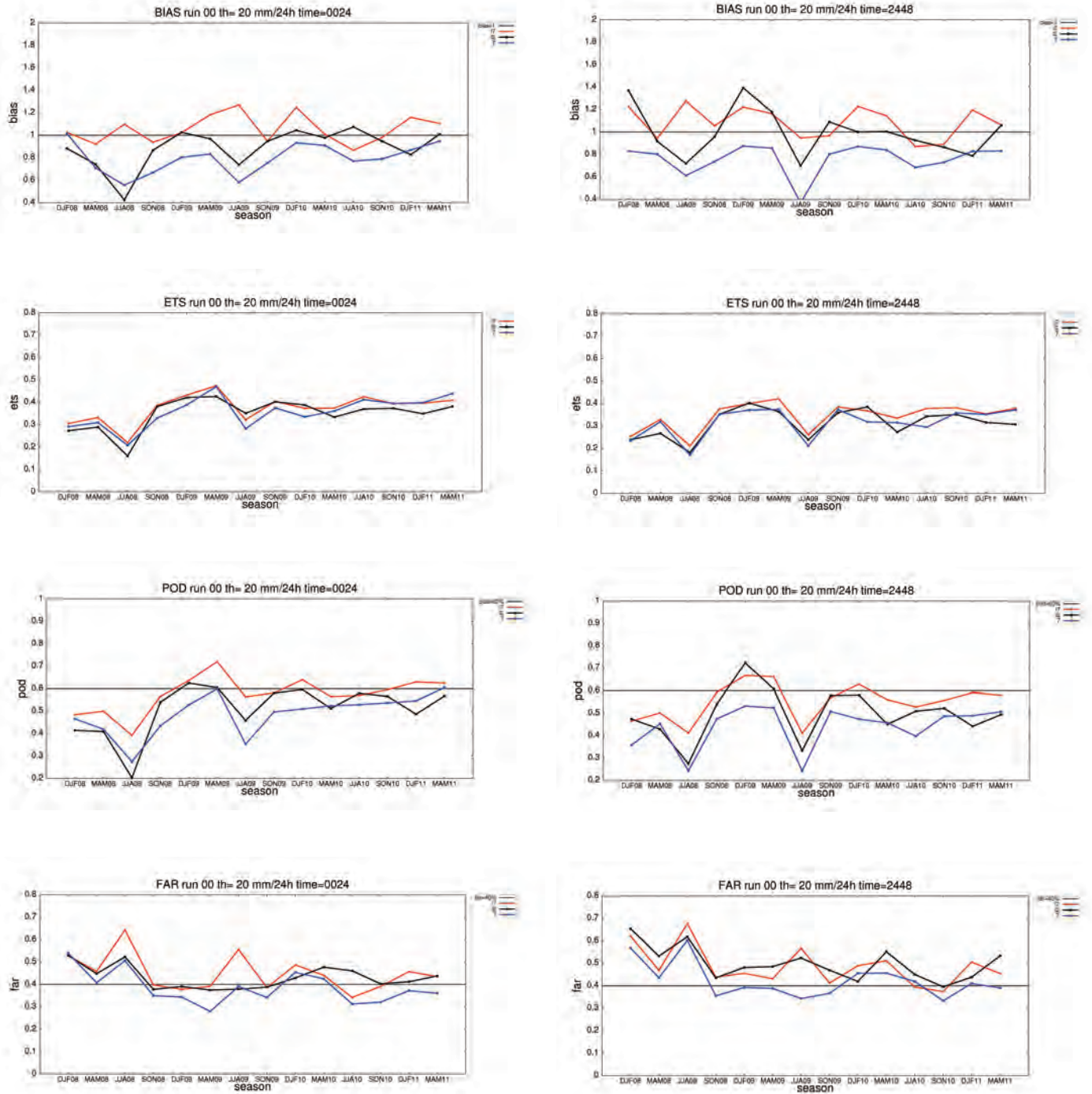


Figura 1.2 - Indici statistici BIAS, ETS, POD e FAR per la soglia di 20mm/24h. A sinistra le prime 24h e a destra le seconde 24h. COSMO-17 in rosso, COSMO-12 in nero e COSMO-7 in blu.

In Figura 1.3 sono mostrati i principali indici statistici ottenuti considerando la precipitazione cumulata su 6 h a partire dalla scadenza 00-06UTC fino alla 66-72UTC per i modelli considerati (la simulazione di COSMO-I2 termina a +48h). In questo caso il periodo è da dicembre 2009 a maggio 2011 ed i risultati si possono così schematizzare:

- per soglie basse i modelli hanno in generale gli stessi indici, anche se COSMO-I7 tende un po' a sovrastimare e COSMO-7 a sottostimare;
- in tutti i modelli il valore e le performance degradano con l'aumentare della scadenza;
- per soglie alte tutti i modelli sottostimano, in particolare COSMO-7;
- l'indice ETS è molto basso per soglie alte;
- per soglie alte si osserva che la precipitazione viene prevista meglio in tarda serata, mentre è prevista peggio al mattino.

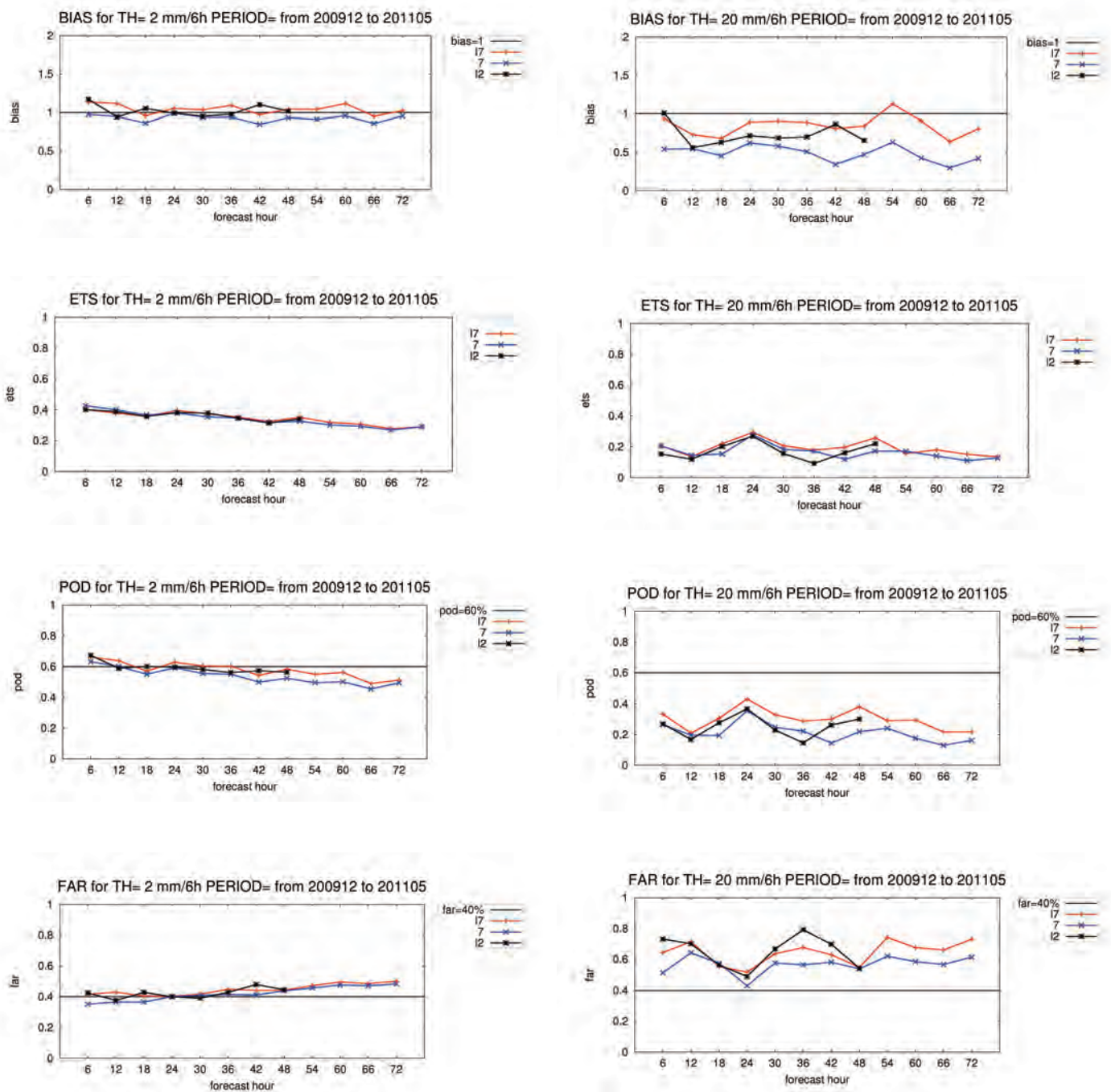


Figura 1.3 – Andamento di BIAS, ETS, POD e FAR dei modelli COSMO-7, COSMO-I7 e COSMO-I2 per la soglia di 2mm/6h (a sinistra) e 20mm/6h (a destra) dal dicembre 2009 al maggio 2011 in funzione della scadenza previsionale. COSMO-I7 in rosso, COSMO-I2 in nero e COSMO-7 in blu.

Si è studiata infine la distribuzione spaziale dell'errore, considerando il periodo da dicembre 2009 a maggio 2011, la soglia di 10 mm/24h e calcolando i valori medi degli indici su ciascuna area di allertamento (Figura 1.4).

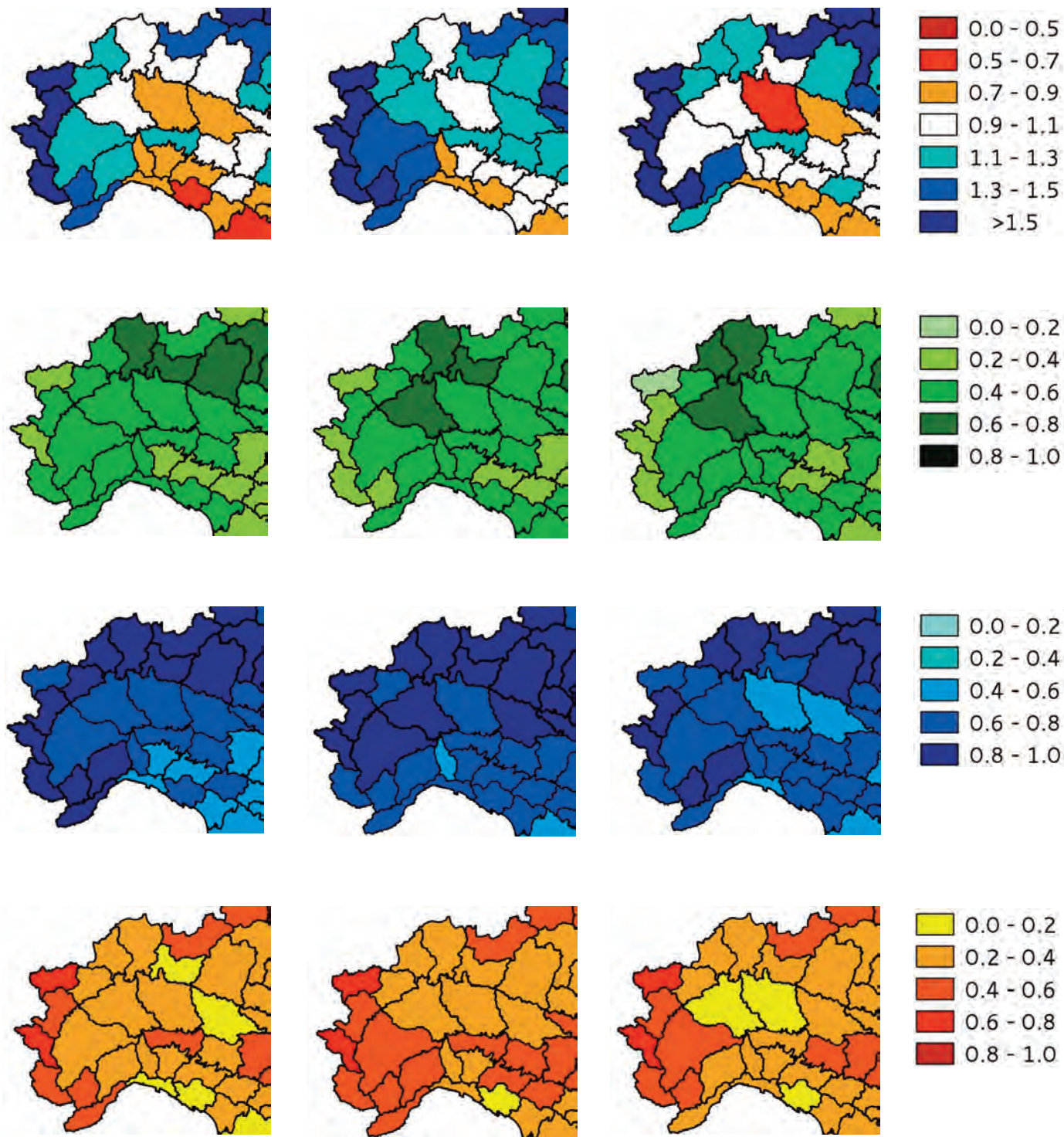


Figura 1.4 - Distribuzione spaziale di BIAS (prima riga), ETS (seconda riga), POD (terza riga) e FAR (quarta riga) dei modelli COSMO-7 (a sinistra), COSMO-17 (al centro) e COSMO-12 (a destra) per la soglia di 10mm/24h tra dicembre 2009 e maggio 2011.

Riassumendo:

- tutti i modelli sovrastimano sull'arco alpino occidentale;
- COSMO-7 sottostima maggiormente in pianura;
- COSMO-I7 sovrastima più degli altri;
- i comportamenti peggiori sono sull'arco alpino;
- forte sottostima sull'Appennino da parte di tutti i modelli;
- tutti i modelli si comportano bene sulla zona nord del Toce-Ticino.

La particolarità del modello COSMO-7 (riscontrabile in tutti i grafici visualizzati in precedenza) è che lo schema numerico di integrazione tende ad "asciugare" il modello. Questo da un lato lo migliora sulle Alpi (dove prima c'era una forte sovrastima), dall'altro lato, altrove, lo penalizza.

3. STUDIO SULLA SENSITIVITÀ DEL MODELLO AI PARAMETRI ASSIMILATI TRAMITE LA TECNICA DEL NUDGING

Le procedure di assimilazione dei dati osservati (observation nudging) rappresentano un anello di estrema importanza nella catena modellistica, in quanto forniscono, a partire dalle osservazioni disponibili, una stima dello stato iniziale dell'atmosfera, la cosiddetta analisi. Questa costituisce la condizione iniziale a partire dalla quale le equazioni differenziali del modello vengono integrate. Il fatto che le misure osservate siano disponibili in numero limitato e in modo non uniforme introduce un pesante fattore di incertezza nelle condizioni iniziali, che si ripercuote inevitabilmente sui risultati della previsione, divenendo fonte di errore. La rete GTS comprende centinaia di stazioni di rilevamento meteorologico di differente tipologia, tra cui stazioni al suolo, radiosondaggi, dati da boe, da navi, da aerei, da satellite e radar. Tali dati sono disseminati quotidianamente dal WMO ai centri di ricerca e ai servizi meteorologici. Tuttavia la copertura che essi forniscono del globo terracqueo è assai disomogenea e non consente di ricostruire uno stato iniziale dell'atmosfera uniforme a livello planetario. Le reti di misura non sinottiche, invece, hanno generalmente una maggiore risoluzione, sia temporale che spaziale e possono rivelarsi uno strumento di estrema utilità, se utilizzate nella catena di assimilazione dei modelli numerici per la previsione del tempo. Essendo infatti questi ultimi deterministici, la loro dipendenza dalla condizione iniziale è molto stringente: maggiore è la rappresentatività di quest'ultima e maggiore sarà l'affidabilità della previsione. La rete di monitoraggio meteo-idro-pluviometrico di Arpa Piemonte e MeteoSvizzera (Ticino) annovera più di 500 stazioni di misura al suolo, con una risoluzione temporale che va dai 10 ai 30 minuti a seconda del tipo di sensore e una densità spaziale di circa 100 km². Si ritiene quindi che una migliore condizione iniziale possa consentire risultati modellistici più affidabili, in particolar modo per quanto riguarda quei campi, come la precipitazione e la temperatura a due metri, che sono più difficili da simulare correttamente. In precedenti lavori (Milelli et al., 2010) sono stati messi in luce gli effetti dell'assimilazione della Temperatura a 2m (T2m) sulla descrizione dello stato superficiale dato da COSMO, in fase di analisi e nelle prime ore previsionali. Si è messo in luce, principalmente, come gli eventuali benefici dell'assimilazione della T2m non siano, in ogni caso, di lunga durata nella fase previsionale del modello. Una possibile causa di ciò va ricercata proprio nel fatto che solo i livelli prognostici atmosferici sono influenzati direttamente dagli incrementi causati dall'observation nudging. Tuttavia, specie durante le ore della giornata in cui è attiva la convezione atmosferica, gli incrementi di analisi vengono dispersi dallo sviluppo della turbolenza atmosferica in un tempo scala molto breve, dell'ordine di grandezza dell'ora (tempo scala, tra l'altro, utilizzato proprio nella definizione della turbolenza nello strato limite planetario). Un metodo per poter provare ad aumentare i benefici dell'assimilazione delle osservazioni a due metri di temperatura consiste nell'accoppiare l'assimilazione dei dati di T2m alla descrizione dello stato del suolo. Infatti, il suolo varia la propria temperatura su tempi scala decisamente più lunghi di quelli che caratterizzano lo strato superficiale atmosferico e lo strato limite planetario. La tecnica impiegata per implementare

questo metodo prende il nome di FASDAS (l'acronimo sta per Flux-Adjusting Data Assimilation System). FASDAS (Alapaty et al., 2001 e 2008) è stata implementata in COSMO, dando la possibilità, così, di analizzare anche lo stato del suolo usando le osservazioni di temperatura e umidità a due metri (RH2m). Questa operazione di assimilazione dei dati e produzione delle analisi viene eseguita contemporaneamente al resto delle procedure relative all'observation nudging durante l'esecuzione stessa di COSMO. Questo approccio ha il vantaggio di eseguire in un unico passo e con un unico metodo tutta la fase di produzione delle analisi per l'inizializzazione di una corsa previsionale del modello. Per ovviare al fatto che le procedure di assimilazione dei dati in COSMO non prevedono un accoppiamento esplicito tra variazione della temperatura a due metri e temperatura del suolo, ma solo un effetto sui livelli atmosferici del modello, è stata implementata in COSMO la tecnica FASDAS ad integrazione delle procedure di assimilazione già presenti nel codice ufficiale. Ci sono alcuni accorgimenti per migliorare le previsioni nello strato limite planetario sfruttando l'assimilazione dei dati di temperatura e umidità a due metri, sottolineando le conseguenze che l'assimilazione di temperatura e umidità deve avere sui valori dei flussi turbolenti e sullo stato idrico e termico del suolo. Questi accorgimenti sono proprio l'accoppiamento esplicito menzionato sopra, ora inesistente nel codice ufficiale di COSMO. I lavori partono dall'assunzione che gli errori nella simulazione dello strato limite planetario diminuiscono se l'assimilazione di temperatura e umidità a due metri non hanno grosso impatto sull'equilibrio del modello.

Per una data grandezza α , sia essa la temperatura o l'umidità a due metri, si può scrivere:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = M(\alpha, z, t) + G_\alpha(\hat{\alpha} - \alpha) \equiv \frac{\partial \alpha^P}{\partial t} + \frac{\partial \alpha^F}{\partial t} \quad (1)$$

dove l'operatore M è l'evoluzione data dalla fisica e dalla dinamica descritte nel modello atmosferico (COSMO, nel presente caso) e il termine $G_\alpha(\hat{\alpha} - \alpha)$ il termine correttivo alla dinamica dato dall'observation nudging. Si definiscono questi due termini come variazioni temporali della variabile α dati dalla fisica (apice P) e dati dall'assimilazione dati (apice F).

Ricordando che la variazione di α è legata alla divergenza del flusso ad essa corrispondente calcolata tra il primo livello del modello (H_1^α) e il livello superficiale (H_s^α),

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = - \frac{H_1^\alpha - H_s^\alpha}{\rho C \Delta z} \quad (2)$$

dove ρ è la densità dell'aria, C la capacità termica, si ha che è possibile associare un flusso relativo ad α alla sua variazione temporale data dall'observation nudging:

$$H^{\alpha,F} = \rho C \left(\frac{\partial \alpha^F}{\partial t} \right) \Delta z \quad (3)$$

Calcolati questi flussi correttivi, è possibile calcolare la variazione di temperatura del suolo da apportare affinché la situazione descritta dal modello rimanga fisicamente consistente. Si calcola quindi:

$$\Delta T_g^F = \left(\frac{\partial T_g^F}{\partial t} \right) \Delta t = (H_{\theta,S}^F - H_{q,S}^F) \frac{\Delta t}{C_g} \quad (4)$$

dove il pedice g sta per il suolo, $H_{\theta,S}$ e $H_{q,S}$ sono rispettivamente i flussi di calore sensibile e latente alla superficie. Secondo questo approccio, i flussi sono corretti affinché la temperatura e l'umidità descritte dal modello convergano verso quelle osservate, in maniera indipendente dalla ragione per cui i valori del modello non rispecchiano quelli osservati. Ad ogni modo, comunque, viene preservata la consistenza tra temperatura del suolo, flussi, e osservazioni di temperatura e umidità. Si è visto dall'equazione precedente come la correzione della temperatura del suolo dipenda dalla correzione dei flussi di calore sensibile e latente. Si rende quindi necessaria, oltre all'assimilazione della temperatura a due metri, anche quella dell'umidità per non vanificare questo approccio. Per quanto riguarda la stima dell'umidità del suolo, bisogna ricordare che allo stato attuale dell'arte, le tecniche correnti di assimilazione dati le attribuiscono le maggiori responsabilità degli errori sulla

temperatura a due metri prodotta dai modelli. Tuttavia, è possibile che la causa di una cattiva prestazione di un modello non sia imputabile all'umidità del suolo, ma a qualche altra ragione; in questo caso, andare a correggere l'umidità per forzare il modello a produrre un buon valore della temperatura a due metri non sarebbe altro che l'introduzione di un ulteriore problema anziché il rimedio ad un problema presente.

Prima di proseguire è opportuno dare alcune definizioni:

- q_a : rapporto di mescolamento nello strato superficiale;
- Δq_a : variazione temporale del rapporto di mescolamento dovuto al rimescolamento turbolento;
- $\psi_a \equiv \Delta q_a / q_a$: normalizzazione;
- $E = E_{dir} + E_{can} + \sum_{layers} E_{trasp}$: evapotraspirazione, intesa come la somma di una componente diretta, evaporazione dalla vegetazione e traspirazione dai diversi strati in cui il suolo è discretizzato.

Si calcola quindi un flusso correttivo all'evaporazione dalle diversi componenti dell'interfaccia suolo-atmosfera, per ogni componente ζ come:

$$E_{\zeta}^F = \left(\frac{E_{\zeta}}{E} \right) \psi_a \left(\frac{H_q^F}{\rho_w L} \right) \quad (5)$$

A questo punto, si somma la corrispondente correzione al flusso di evaporazione all'opportuna equazione di bilancio idrico. In questo modo, si attribuisce la maggior parte della correzione alla componente che è maggiormente coinvolta nell'evapotraspirazione.

Dopo l'implementazione di FASDAS in COSMO si è proceduto ad effettuare un test sulle sue prestazioni. Sono state create tre catene di procedure con lo scopo di far girare COSMO in differenti condizioni. La configurazione di COSMO scelta è essenzialmente quella di COSMO-I2, ad eccezione dei seguenti punti:

- il dominio di simulazione è più piccolo rispetto a quello operativo ufficiale di COSMO-I2; nel test in questione il dominio è incentrato principalmente sull'Italia Settentrionale (Figura 1.5);
- lo schema di suolo utilizzato non è quello a due strati ma la nuova versione multistrato. Tale scelta è dovuta ad una maggiore semplicità di implementazione di FASDAS su tale schema di suolo, nonché al fatto che è in programma una modifica della configurazione operativa della catena ufficiale di COSMO-I2, che abbandonerà lo schema a due strati in favore di quello multistrato.

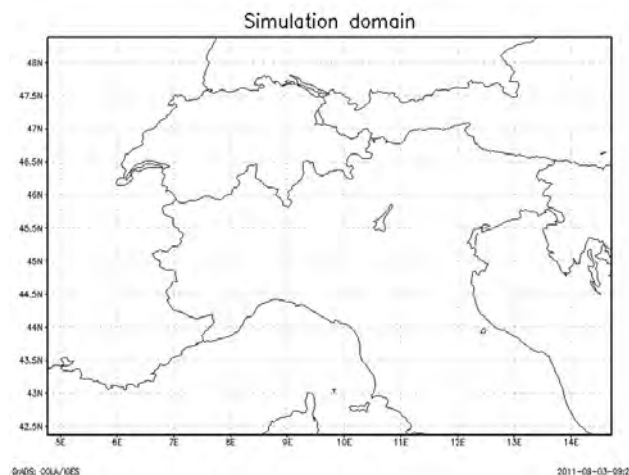


Figura 1.5 – Dominio delle simulazioni.

Le tre catene di procedure si differenziano tra loro per il fatto che:

- la prima catena ha l'assimilazione dei dati completamente disattivata e viene solamente guidata dalle condizioni al contorno (nominata “NAS” nel resto del lavoro);
- la seconda catena ha l'assimilazione dei dati di temperatura e umidità a due metri della rete ARPA e dei dati della rete GTS utilizzando gli schemi ufficiali di COSMO (nominata “ASS” nel resto del lavoro);
- la terza catena ha l'assimilazione dei dati di temperatura e umidità a due metri della rete ARPA e dei dati della rete GTS utilizzando gli schemi ufficiali di COSMO e gli schemi relativi a FASDAS (nominata “FAS” nel resto del lavoro).

Solo metà delle stazioni meteorologiche della rete sono state utilizzate per l'assimilazione dei dati; l'altra metà è utilizzata per la verifica del modello stesso. La determinazione di quali stazioni siano usate per l'assimilazione o per la verifica è stata effettuata casualmente, in modo che ci fosse un numero simile di stazioni di montagna e di pianura, e che queste fossero distribuite in maniera omogenea sul territorio (Figura 1.6). Tutte e tre le catene utilizzano le stesse condizioni al contorno, date dalle corse operative ufficiali di COSMO-I7. L'inizializzazione delle catene è stata effettuata il giorno 1 luglio 2011 alle 00UTC, a partire da condizioni iniziali ottenute interpolando l'analisi di COSMO-I7 operativo valida per quella scadenza. Le tre catene sono costituite da corse di COSMO lunghe 12 ore e sono programmate per essere eseguite alle 00UTC e alle 12UTC di ogni giorno, e rappresentano le 12 ore precedenti alla scadenza alla quale sono eseguite. Le condizioni iniziali di ciascun segmento della catena sono date dallo stato descritto dall'ultima scadenza del segmento di catena precedente. In questo modo, è come avere una lunga e ininterrotta simulazione eseguita in modalità di analisi. Nel caso in cui una delle tre catene si interrompa per un qualsiasi tipo di errore, essa viene inizializzata nuovamente a partire dall'interpolazione dei campi di analisi di COSMO-I7 operativo, relativa alla scadenza a cui la catena si è interrotta. Per ciascuna simulazione della catena sono stati selezionati alcuni valori relativi ad alcuni campi per la verifica. In particolare vengono qui mostrati i risultati relativi alla verifica nel mese di luglio 2011, che si è distinto per le sue anomale caratteristiche meteorologiche. Come si vede dalla Figura 1.7 infatti, è stato un mese particolarmente umido e freddo.

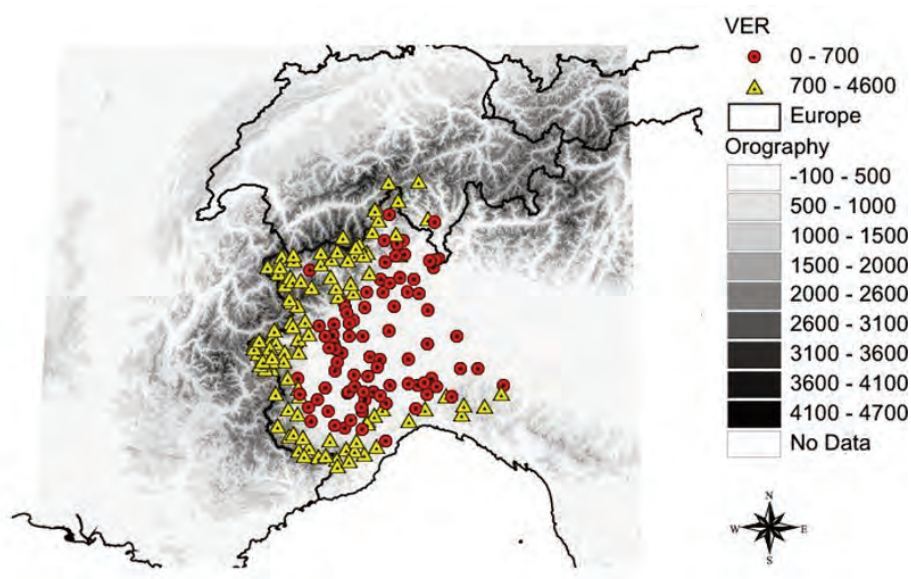
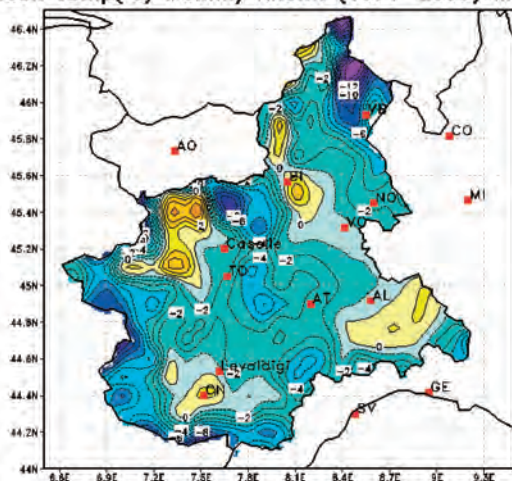


Figura 1.6 – Stazioni del bacino del Po occidentale utilizzate nel lavoro: in rosso stazioni al di sotto di 700 m, in giallo sopra i 700m

2m Mean Temp(°C) Monthly Anom. (1971-2000) in JUL2011



Monthly precipitation diff. (obs-med) in mm at JUL2011 Climatological period 1971-2000

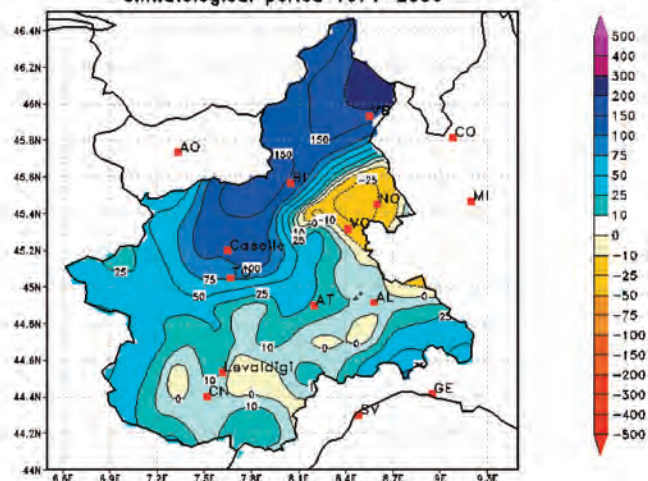


Figura 1.7 - Anomalia di temperatura a 2m sul Piemonte nel mese di luglio 2011 (a sinistra) rispetto alla media del periodo 1971-2000. Anomalia di precipitazione sul Piemonte nel mese di luglio 2011 (a destra) rispetto alla media del periodo 1971-2000.

Per ciascuna catena è stata calcolata la radice degli scarti quadratici medi rispetto alle stazioni usate per la verifica. La Figura 1.8 rappresenta un confronto di tali indici delle corse FAS e ASS rispetto alla simulazione NAS, per ciascuna data e per ogni ora del giorno, relativamente alla temperatura a due metri. Tale differenza è rappresentata normalizzata rispetto all'intervallo di confidenza al 90% dell'indice statistico in questione. Ciascun punto della figura, dove bianco, rappresenta una differenza non significativa delle corse con assimilazione rispetto a quella senza assimilazione; laddove è verde, la differenza è favorevole alle corse con assimilazione rispetto a quella senza, dove è rosso la differenza è sfavorevole. In blu, e con gli ellissi, sono rappresentate le giornate piovose. I grossi miglioramenti delle corse con assimilazione avvengono in corrispondenza delle giornate piovose. Nel primo periodo piovoso, in particolare, FAS migliora sensibilmente le proprie prestazioni anche rispetto alla corsa ASS.

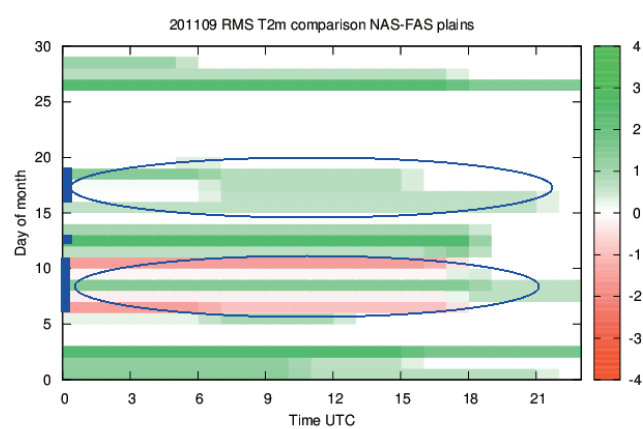
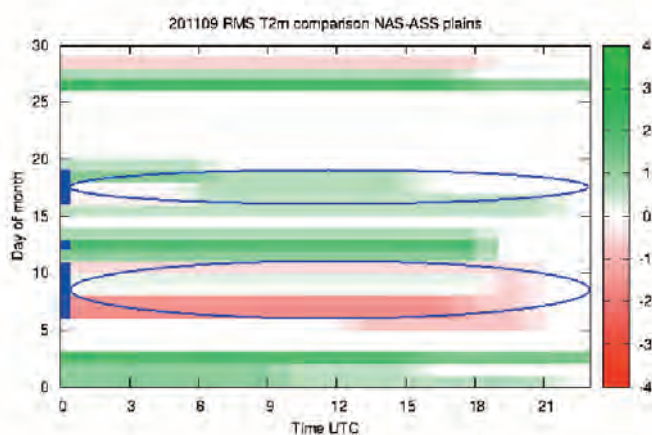


Figura 1.8 - Confronto della radice degli scarti quadratici medi per la temperatura a due metri a luglio 2011: ASS rispetto a NAS (a sinistra) e FAS rispetto a NAS (a destra); con gli ellissi, sono rappresentate le giornate piovose.

La Figura 1.9 è analoga alla 1.8 ma per l'umidità a due metri. Anche in questo caso, il miglioramento è visibile in corrispondenza degli stessi periodi. Si puntualizza tuttavia che sono da trascurare i valori successivi al 26 luglio, in quanto si è dovuto inizializzare nuovamente le catene a partire dall'interpolazione dello stato di COSMO-I7 per un malfunzionamento delle procedure che gestiscono il calcolo delle condizioni al contorno per COSMO-I2.

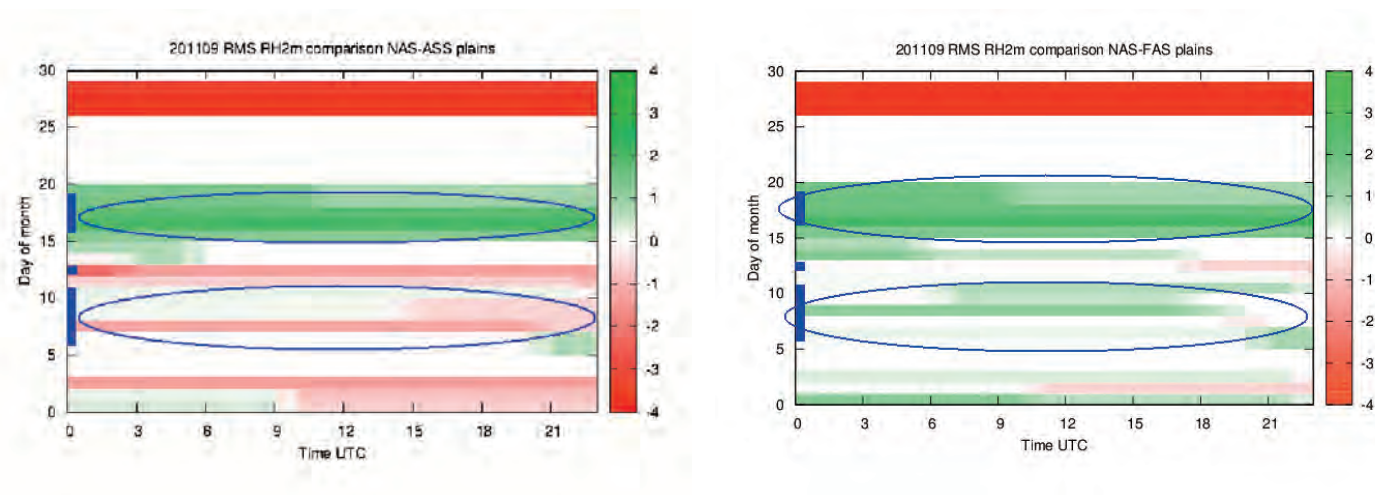


Figura 1.9 – Confronto della radice degli scarti quadratici medi per l'umidità a due metri a luglio 2011: ASS rispetto a NAS (sinistra) e FAS rispetto a NAS (destra); con gli ellissi, sono rappresentate le giornate piovose.

Ulteriori test sono stati condotti sulla descrizione del bilancio energetico superficiale. Mancando le osservazioni dirette dei flussi di calore latente e sensibile, i loro valori sono stati calcolati per mezzo delle simulazioni operative di UTOPIA (noto in precedenza come LSPM, si veda per esempio Cassardo et al., 1995), uno schema utilizzato operativamente per scopi di monitoraggio agrometeorologico. UTOPIA calcola, tra le altre cose, i flussi di calore sensibile e latente a partire dai valori delle osservazioni comunemente condotte nelle capannine meteorologiche. La Figura 1.10 rappresenta l'errore medio e la radice dello scarto quadratico medio per il flusso di calore latente e sensibile per le differenti catene di simulazione. Si nota che l'assimilazione migliora generalmente la descrizione del bilancio energetico superficiale e l'introduzione di FASDAS costituisce un ulteriore valore aggiunto. Il flusso di calore latente è generalmente sovrastimato da COSMO in ciascuna catena, ad eccezione delle prime ore della sera. Al contrario, il flusso di calore sensibile è generalmente sottostimato. Nelle ore mattutine l'introduzione dell'assimilazione ne peggiora la descrizione. Si evince però che l'introduzione di FASDAS determina un peggioramento minore rispetto all'assimilazione ufficiale.

Come ultimo test infine, sono stati confrontati i valori dei flussi turbolenti calcolati da UTOPIA e descritti dalle tre catene di COSMO per una specifica stazione di pianura in due giornate di bel tempo, di cui una veniva dopo un periodo di pioggia, e l'altra dopo una serie di giornate consecutive di bel tempo.

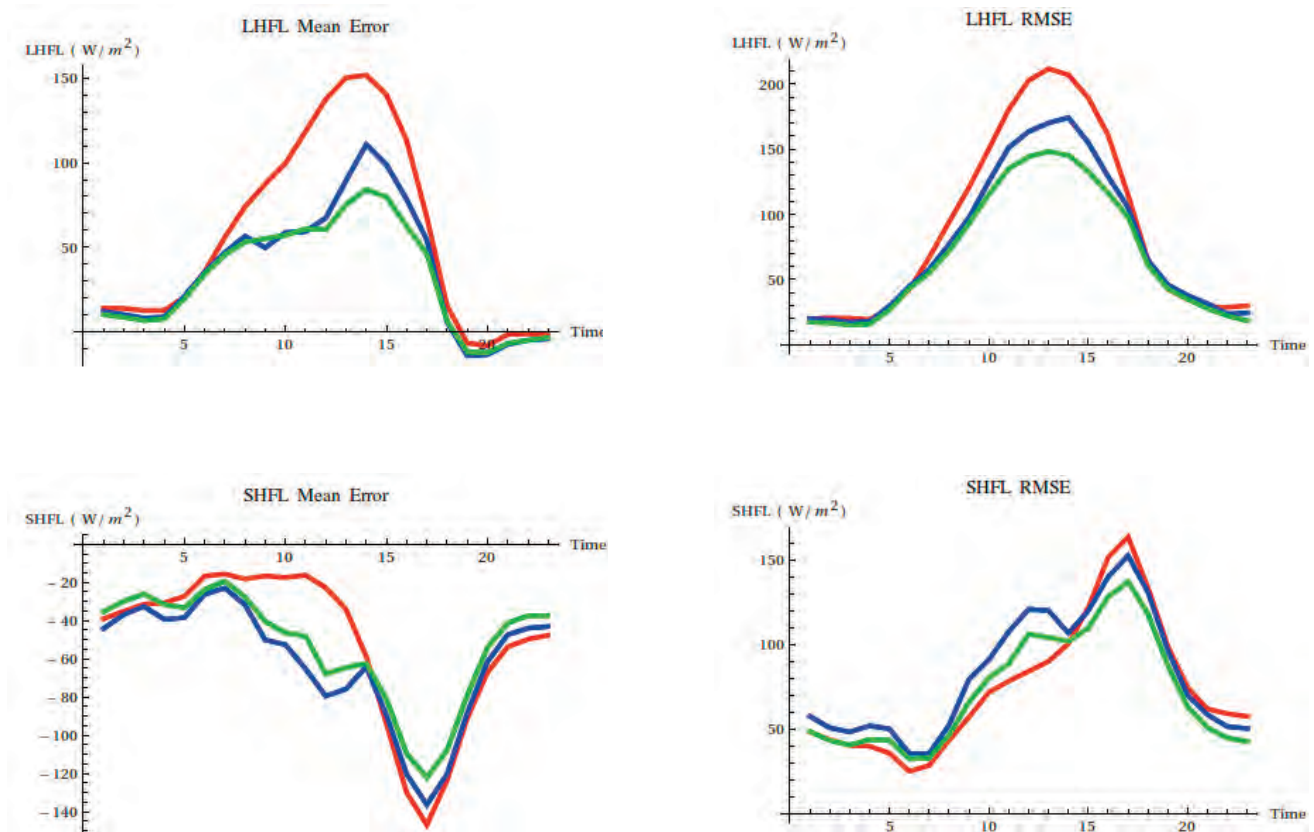


Figura 1.10 – Errore medio per il flusso di calore latente (in alto a sinistra), radice dello scarto quadratico medio per il flusso di calore latente (in alto a destra), errore medio per il flusso di calore sensibile (in basso a sinistra), radice dello scarto quadratico medio per il flusso di calore sensibile (in basso a destra). NAS in rosso, ASS in blu e FAS in verde.

La parte superiore della Figura 1.11 si riferisce ai valori dei flussi di calore latente e sensibile in una giornata di bel tempo dopo un periodo piovoso. Le differenze tra i valori del flusso di calore latente non sono evidenti eccetto nelle ore centrali della giornata. Entrambe le corse con assimilazione peggiorano rispetto alla corsa libera per una scadenza temporale, ma poi sono le prime a riallinearsi ai valori calcolati da UTOPIA. Nel caso del flusso di calore sensibile, invece, le differenze più grandi si trovano nella seconda parte della giornata. Nonostante le corse con assimilazione individuino meglio il valore di picco del flusso di calore sensibile, tutte le corse di COSMO lo fanno diminuire troppo rapidamente a valori caratteristici della notte.

La parte inferiore della Figura 1.11 si riferisce a giornate di bel tempo alla fine di un periodo di giornate di bel tempo consecutive. Nel caso del flusso di calore latente, è evidente la sovrastima data dalla corsa libera di COSMO (NAS). Questa sovrastima è alleviata parzialmente dalla corsa ASS, ma una prestazione migliore è offerta dalla corsa FASDAS. In tutti i casi, comunque, avviene un anticipo della descrizione del picco giornaliero del flusso di calore latente. Nel caso del flusso di calore sensibile, invece, l'effetto più apprezzabile dell'assimilazione è lo spostamento temporale, migliorandolo, del picco giornaliero. Si ha anche un aumento del valore del flusso, ma non a sufficienza da risultare in un miglioramento significativo rispetto alla corsa libera (NAS).

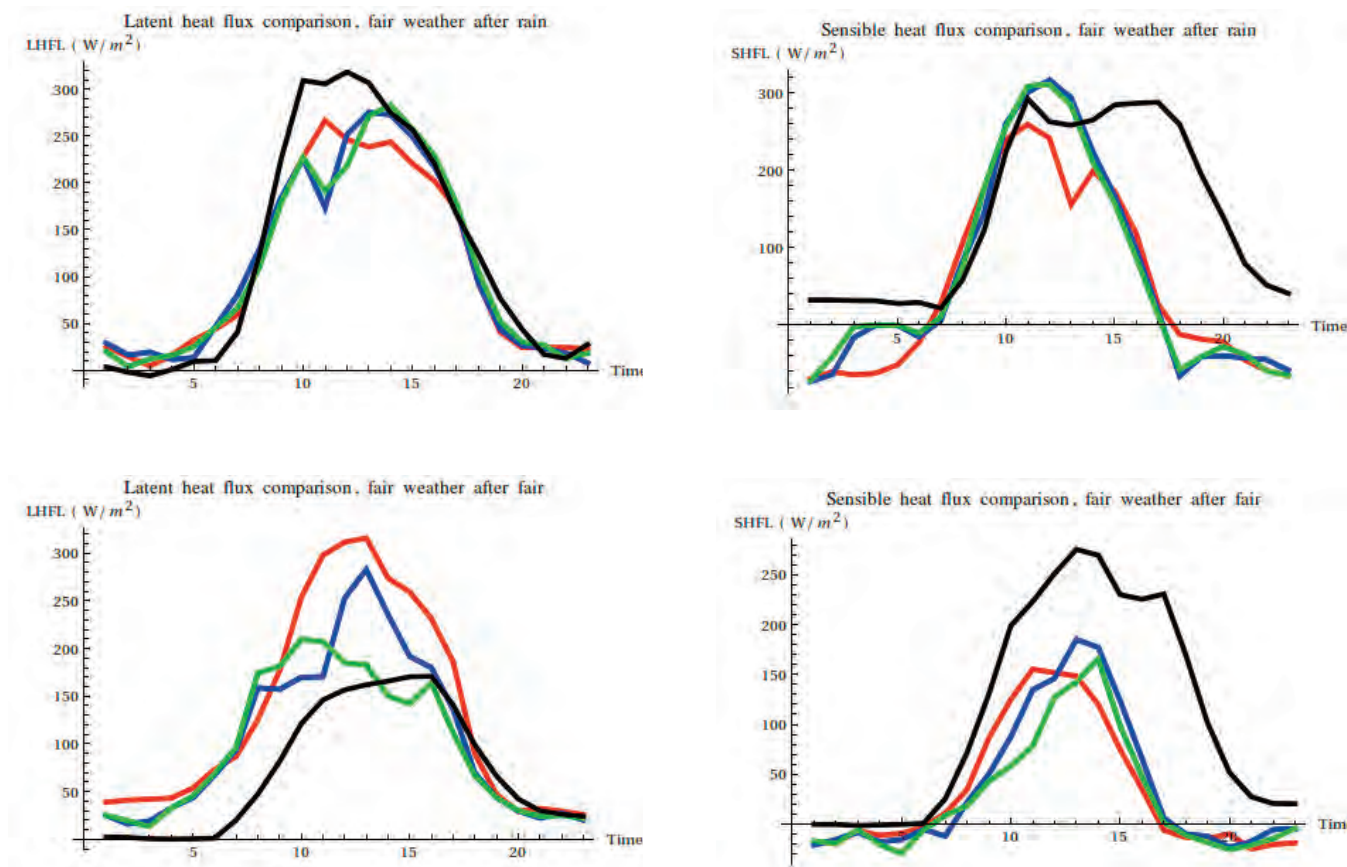


Figura 1.11 – Riga superiore: valori calcolati da UTOPIA e descritti da COSMO per il flusso di calore latente (a sinistra) e sensibile (a destra) in un giorno di bel tempo successivo ad una serie di giorni di pioggia. Riga inferiore: valori calcolati da UTOPIA e descritti da COSMO per il flusso di calore latente (a sinistra) e sensibile (a destra) in un giorno di bel tempo successivo ad una serie di giorni di bel tempo. Osservazioni (da UTOPIA) in nero, NAS in rosso, ASS in blu e FAS in verde.

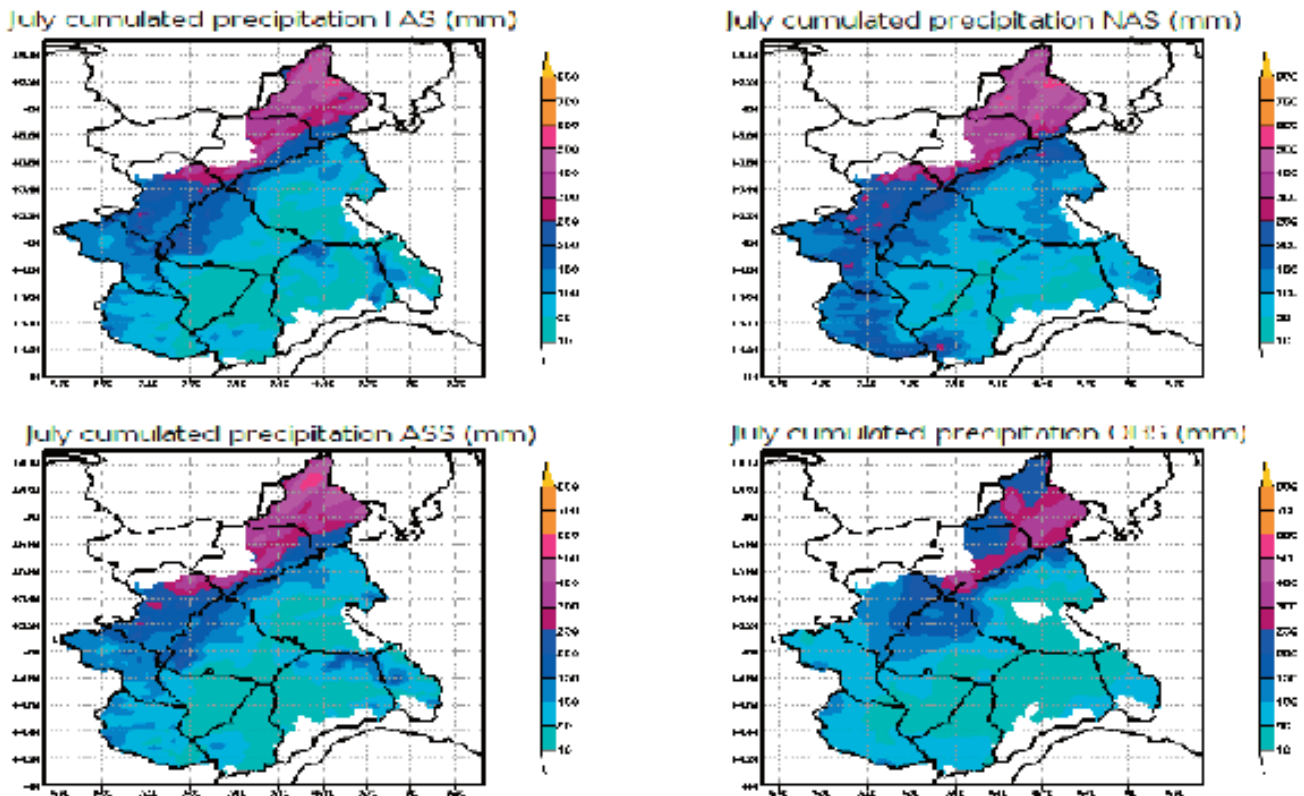


Figura 1.12 – Confronto della quantità di precipitazione cumulata nel corso del mese di luglio 2011. Da in alto a sinistra, in senso orario: FAS, NAS, osservazioni, ASS.

L'analisi dei risultati mostra come FASDAS sia in grado di migliorare la qualità delle analisi prodotte da COSMO-12, in particolare in periodi caratterizzati da un'alta piovosità. In ogni caso, invece, si ha un miglioramento della descrizione del bilancio energetico superficiale. Tuttavia, persistono dei problemi in condizioni particolarmente secche. Un ulteriore segnale di miglioramento è stato trovato in un caso di foehn, ma questo fatto deve essere confermato da una statistica più larga ed approfondita. L'analisi dello stato del suolo presenta ancora dei margini di miglioramento. Si può infatti definire un fattore per rendere maggiori o minori gli incrementi di analisi relativi alla temperatura del suolo. Questi, inoltre, possono essere riportati su un solo strato di suolo o su tutta la colonna. L'analisi dell'umidità del suolo condotta in questo modo, invece, agisce solo sulla correzione dell'evapotraspirazione. Un errore nella descrizione della precipitazione, invece, rappresenta una causa di errore sicuramente importante per la stima dell'umidità del suolo. Una prospettiva futura consiste nello sfruttare i dati di precipitazione provenienti dai pluviometri e dai radar per correggere questo tipo di stime errate dell'umidità iniziale del suolo. Onde validare se effettivamente le giornate piovose costituiscono un valido momento per l'applicazione di FASDAS, è in fase di progettazione un esperimento mirato a riprodurre l'evento alluvionale di Genova dell'ottobre 2011 e delle intense precipitazioni sul Piemonte nel novembre dello stesso anno.

E' stata verificata infine, seppure in maniera ancora solo qualitativa, la quantità di precipitazione cumulata nel mese di luglio. I risultati di questa verifica sono riportati nella Figura 1.12 che mostra come la catena senza assimilazione abbia prodotto la descrizione di un mese di luglio decisamente troppo umido rispetto alle corse con assimilazione attivata. Le due catene con assimilazione non danno risultati molto diversi tra loro, seppure FASDAS mostri dei valori meno elevati nella parte settentrionale della regione rispetto ad ASS, e nella parte meridionale ASS sia più umida rispetto a FAS. Tuttavia, la significatività di queste differenze è ancora da stabilire.

4. MIGLIORAMENTO DELLA PREVISIONE CON L'UTILIZZO DI TECNICHE DI POST-PROCESSING

In questo contesto per post-processing si intende il metodo Multimodel SuperEnsemble che è stato proposto per la prima volta da Krishnamurti (1999) utilizzando modelli di previsione globali, ma è stato utilizzato sul nord ovest italiano con modelli ad area limitata (Cane & Milelli, 2006). Come si deduce dal nome, il metodo Multimodel richiede diversi output di modelli diversi, relativi alla medesima scadenza, che sono mediati o pesati con un opportuno set di pesi calcolati durante il cosiddetto "training period" (periodo di apprendimento).

Il metodo può essere applicato indifferentemente sui punti-griglia del modello previsionale (se si ha a disposizione una analisi delle osservazioni su tale scala) su valori mediati sulle aree di allertamento oppure sulle osservazioni di una singola stazione meteorologica, purché in ogni caso siano disponibili le osservazioni per un tempo sufficientemente lungo per ottenere una buona definizione dei pesi. Il metodo può essere applicato seguendo diverse formulazioni, a seconda della disponibilità dei dati previsionali dai modelli:

- poor-man Ensemble (biased): se si hanno solamente a disposizione le osservazioni per il periodo di training e le previsioni per il dato giorno di previsione. Questo metodo tuttavia presenta un bias (errore sistematico) nelle previsioni finali:

$$S = \bar{O} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{O}) \quad (6)$$

dove S è la previsione dell'ensemble, N è il numero di modelli, F_i è la previsione dell'i-esimo modello e \bar{O} è la media delle osservazioni per il dato punto e la data scadenza previsionale;

- poor-man Ensemble (bias-corrected): occorre avere a disposizione le osservazioni e le previsioni di tutti i modelli per tutto il periodo di training. Non richiede particolare potenza di calcolo perché si tratta di una semplice media bias-corrected dei modelli:

$$S = \bar{O} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}_i) \quad (7)$$

dove S è la previsione dell'ensemble, N è il numero di modelli, F_i è la previsione dell'i-esimo modello, \bar{F}_i la media delle previsioni e \bar{O} è la media delle osservazioni per il dato punto e la data scadenza previsionale;

- multimodel SuperEnsemble: occorre avere a disposizione le osservazioni e le previsioni di tutti i modelli per tutto il periodo di training. Inoltre è richiesto il calcolo dei pesi nel periodo di training. Questa operazione richiede una certa potenza di calcolo, che per un numero elevato di corse dei modelli, di scadenze previsionali e di punti può richiedere un certo tempo:

$$S = \bar{O} + \sum_{i=1}^N a_i (F_i - \bar{F}_i) \quad (8)$$

dove S è la previsione di Multimodel, N è il numero di modelli, F_i è la previsione dell'i-esimo modello, ai sono i pesi per ciascun modello, \bar{F}_i la media delle previsioni

e \bar{O} è la media delle osservazioni per il dato punto e la data scadenza previsionale.

Il calcolo dei pesi è dato dalla minimizzazione della somma del quadrato delle deviazioni delle previsioni dalle osservazioni

$$G = \sum_{k=1}^T (S_k - O_k)^2 \quad (9)$$

e, derivando la funzione G rispetto ai pesi, e imponendo che il risultato sia uguale a zero

$$\frac{\partial G}{\partial a_i} = 0 \quad (10)$$

si ottiene un set di N equazioni, dove N è il numero di modelli utilizzati. Il sistema lineare ottenuto può essere risolto con diversi metodi ed in questo caso si utilizza il metodo di Gauss-Jordan (Press et al., 1996).

L'algoritmo per il calcolo del Multimodel SuperEnsemble è il seguente (per ogni punto e per ogni scadenza previsionale):

- lettura dei dati di input;
- calcolo della media delle previsioni \overline{F}_i e delle osservazioni \overline{O} durante il periodo di training T (tale intervallo può essere fisso oppure variabile nel tempo "a finestra mobile");
- calcolo dei valori dei quadrati delle deviazioni delle previsioni dalle osservazioni nel periodo di training e costruzione del sistema lineare con la relative matrice dei coefficienti;
- riduzione della matrice per ottenere i pesi a_i ;
- calcolo del Multimodel SuperEnsemble;
- scrittura dell'output.

Per quanto riguarda la variabile precipitazione, l'algoritmo tende a sovrastimare i valori di pioggia debole perché secondo la formula descritta in precedenza, il valore previsto è sempre diverso da 0, anche se solo pochi modelli sul loro totale prevedono pioggia diversa da zero. Ad esempio in Tabella 1.4 per una data scadenza ed una data area tutti i modelli potrebbero prevedere pioggia nulla eccetto due di essi.

modello 1	modello 2	modello 3	modello 4	modello 5	modello 6	modello 7	modello 8
1 mm	0 mm	0 mm	0 mm	2 mm	0 mm	0 mm	0 mm

Tabella 1.4 – Esempio di output modellistico per il calcolo di Multimodel.

In questo caso si potrebbe pensare che il valore corretto sia 0, ma per come è scritta la formula di Multimodel, il valore sarà sempre maggiore di 0, anche in questo caso. Per ovviare a questo problema, si calcolano gli indici POD (o HRR) e FAR previsti dai modelli nel periodo di training e si definiscono il POD ed il FAR del Multimodel nel modo descritto in Tabella 1.5

$$FAR_{MM} = FAR_1 \cdot (1 - FAR_2) \cdot (1 - FAR_3) \cdot (1 - FAR_4) \cdot FAR_5 \cdot (1 - FAR_6) \cdot (1 - FAR_7) \cdot (1 - FAR_8)$$

$$HRR_{MM} = HRR_1 \cdot (1 - HRR_2) \cdot (1 - HRR_3) \cdot (1 - HRR_4) \cdot HRR_5 \cdot (1 - HRR_6) \cdot (1 - HRR_7) \cdot (1 - HRR_8)$$

Tabella 1.5 – Calcolo di FAR e HRR (POD) per il Multimodel.

Se $FAR_{MM} \geq HRR_{MM}$ allora la precipitazione si pone uguale a 0. In questo modo si riduce molto la sovrastima alle basse soglie.

Molti test sono stati effettuati negli anni:

- combinazioni di diversi modelli;
- diverse corse (00UTC e/o 12UTC);
- diversi tipi di periodo di “apprendimento” (fisso o dinamico);
- diverse lunghezze del periodo di “apprendimento”.

E le risposte sono:

- ECMWF deve essere incluso;
- c'è un valore aggiunto fino a 6/8 modelli;
- i modelli usati sono quindi ECMWF 00UTC e 12UTC, COSMO-I7 00UTC e 12UTC, COSMO-I2 00UTC e 12UTC;
- l'apprendimento dinamico permette di considerare la variazione stagionale della performance del modello, nonché le sue eventuali variazioni di configurazione;
- la lunghezza minima per la precipitazione (per i modelli e l'area di riferimento usata) è di 180 giorni.

I test effettuati hanno dimostrato che il valore aggiunto di Multimodel risulta evidente osservando come l'errore sia più costante al variare della soglia e come (soprattutto per i valori massimi), il maggior HRR corrisponda anche ad un minore FAR. Nei valori medi il FAR risulta nettamente minore ma HRR è maggiormente penalizzato. Tuttavia, l'intrinseca discontinuità spazio-temporale del campo di precipitazione rende l'applicazione di questa tecnica più problematica rispetto ad un campo continuo e autocorrelato come per esempio la temperatura. Conseguentemente, per migliorare l'affidabilità della previsione, e per rendere ancora più efficace l'algoritmo del Multimodel, è stata sviluppata una nuova tecnica basata non sull'aspetto deterministico ma su quello probabilistico, denominata Multimodel SuperEnsemble Dressing (Cane & Milelli, 2010). Tale tecnica è un'evoluzione dell'applicazione classica (descritta precedentemente) ed è volta a produrre previsioni da un punto di vista probabilistico a partire dai risultati dei modelli.

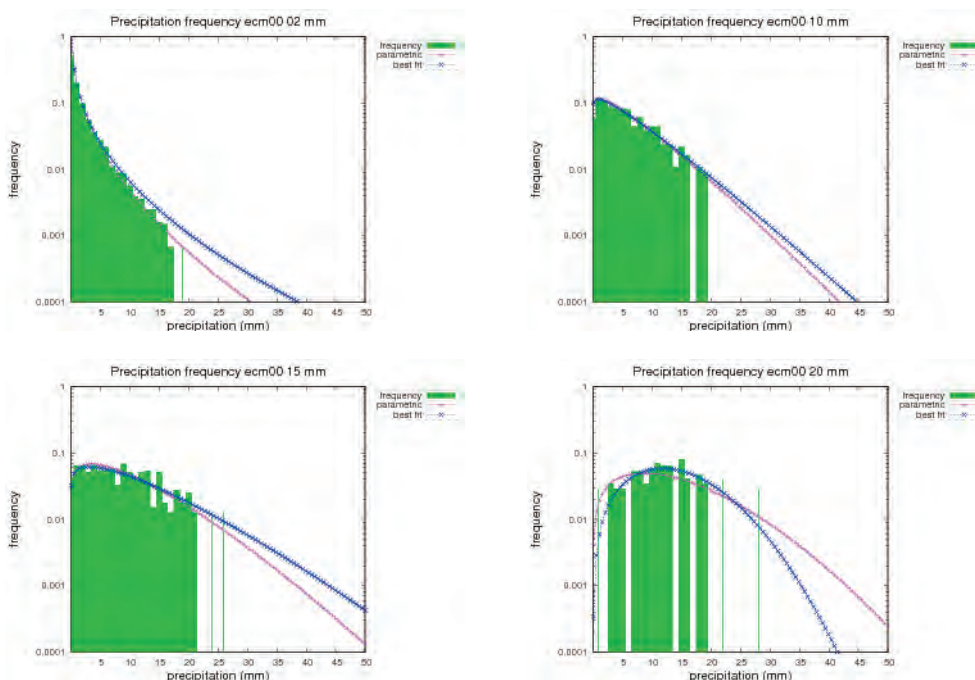


Figura 1.13 – Esempi di PDF condizionata per precipitazioni medie osservate sulle aree di allertamento di Piemonte e Ticino: modello ECMWF delle 00UTC. Dall'alto a sinistra al basso a destra: 2 mm, 10 mm, 15 mm, 25 mm. La linea rosa è la distribuzione Weibull, quella blu è il fit migliore.

La figura 1.13 rappresenta le precipitazioni medie osservate sulle aree d'allertamento di Piemonte e Ticino condizionate alla previsione del modello globale dei ECMWF per diversi valori della precipitazione prevista. Come è evidente, i valori effettivamente osservati si distribuiscono su un ampio spettro di valori, spesso significativamente lontano dal valore previsto. A fronte di una previsione di 2 mm, infatti, si possono osservare anche 17-18 mm, mentre una previsione di 15 mm presenta una distribuzione delle osservazioni piuttosto ampia da 0 a 20 mm. Non tutti gli errori riportati sono dovuti al modello ma sono inclusi anche problemi di misura quali la neve fusa nei pluviometri, tuttavia per ciascun modello si possono identificare le distribuzioni di pioggia osservate condizionate ad un ampio spettro di valori previsti.

Le distribuzioni di probabilità empiriche così identificate (Probability Density Function, PDF) possono tuttavia essere utilizzate per una più corretta valutazione della precipitazione in termini probabilistici. E' infatti possibile calibrare tali distribuzioni con un'opportuna funzione di distribuzione (Weibull) e disporre quindi di una PDF per ciascun modello considerato.

Le varie PDF possono essere pesate con vari sistemi di pesi calcolati nel periodo di training (Fig. 1.14). Dopo varie prove, è stato scelto l'inverso del Continuous Ranked Probability Score (si veda ad esempio Wilks, 1995), che dà i risultati migliori rispetto alle osservazioni e ad altre tecniche disponibili in letteratura.

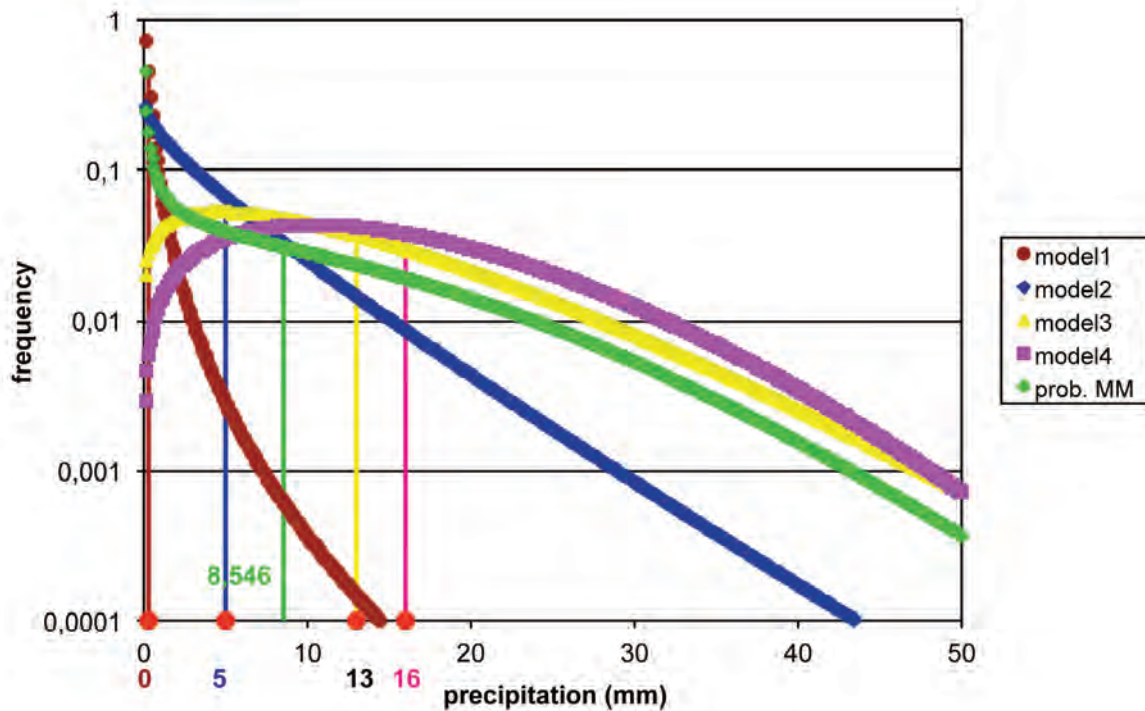


Figura 1.14 – Schema per il calcolo della funzione di distribuzione di probabilità con Multimodel SuperEnsemble Dressing a partire dalle funzioni di distribuzione di probabilità di più modelli.

Si descrive qui un esempio di utilizzo delle previsioni probabilistiche ottenute con il Multimodel SuperEnsemble Dressing. Possono essere create una serie di mappe di probabilità di superamento di soglie sulle aree di allertamento di Piemonte e Ticino e una serie di grafici che mostrano i valori di precipitazione previsti dai modelli meteorologici e la distribuzione di probabilità prevista dal Multimodel SuperEnsemble Dressing. Le Figure 1.15, 1.16, 1.18, 1.19 sono state ottenute il giorno 4 novembre 2011 e sono relative alle forti precipitazioni che hanno causato un evento alluvionale su buona parte del territorio piemontese e ligure. Si tratta quindi di un caso studio di particolare importanza data l'intensità del fenomeno e la sua estensione spaziale. I modelli utilizzati sono il

modello globale di ECMWF, COSMO-17 (entrambi modelli di riferimento per il sistema di allertamento nazionale) e COSMO-7, il modello utilizzato operativamente presso MeteoSvizzera. Nel calcolo di Multimodel vengono considerati sia le simulazioni che partono alle 00UTC che quelle delle 12UTC.

In particolare, le Figure 1.15 e 1.16 mostrano le mappe di probabilità di precipitazione media e massima sulle aree di allertamento per diverse soglie. Le mappe vengono prodotte su intervalli di 6 ore fino a 72 ore di previsione. Qui vengono mostrate, a titolo di esempio, solo le prime tre scadenze, dalle 12 del 4 novembre 2011 alle 6 del 5 novembre. Da sottolineare il forte segnale di superamento anche per soglie di precipitazione relativamente elevate (20 mm/6h per le medie e 50 mm/6h per le massime).

Qualitativamente, le probabilità di precipitazione sono molto ben in accordo con la pioggia osservata, ma è necessaria anche un'analisi oggettiva.

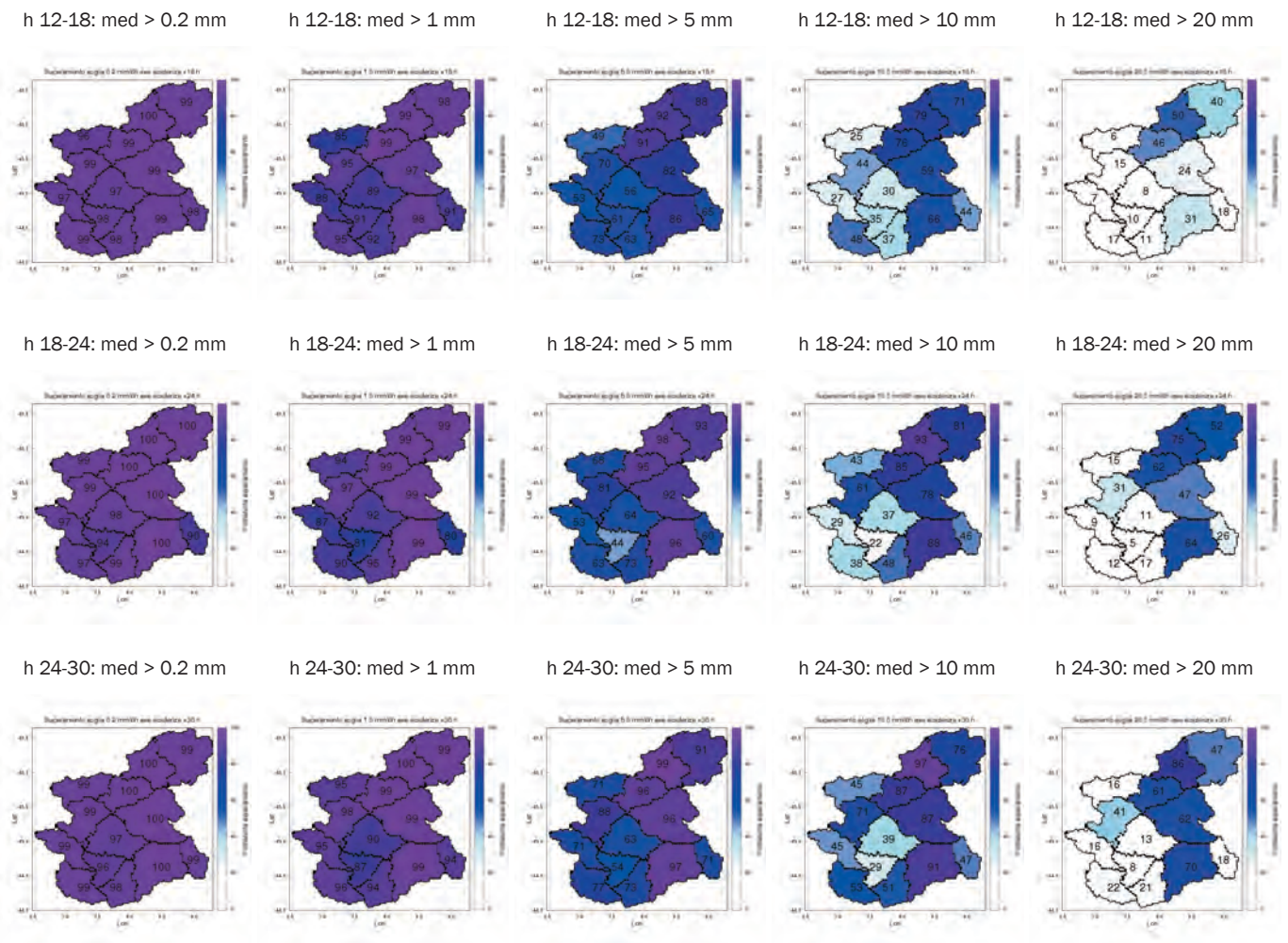


Figura 1.15 - Mappe di probabilità di precipitazione media sulle aree allertamento emesse il giorno 4 novembre 2011 con il Multimodel SuperEnsemble Dressing e relative agli intervalli di 6 ore successivi a partire dalle 12 del pomeriggio. Le colonne indicano la soglia: 0.2 mm/6h, 1 mm/6h, 5 mm/6h, 10 mm/6h, 20 mm/6h rispettivamente. Le righe indicano la scadenza previsionale: +12/+18 in alto, +18/+24 al centro, +24/+30 in basso. In ogni area è indicata la probabilità di superamento (%).

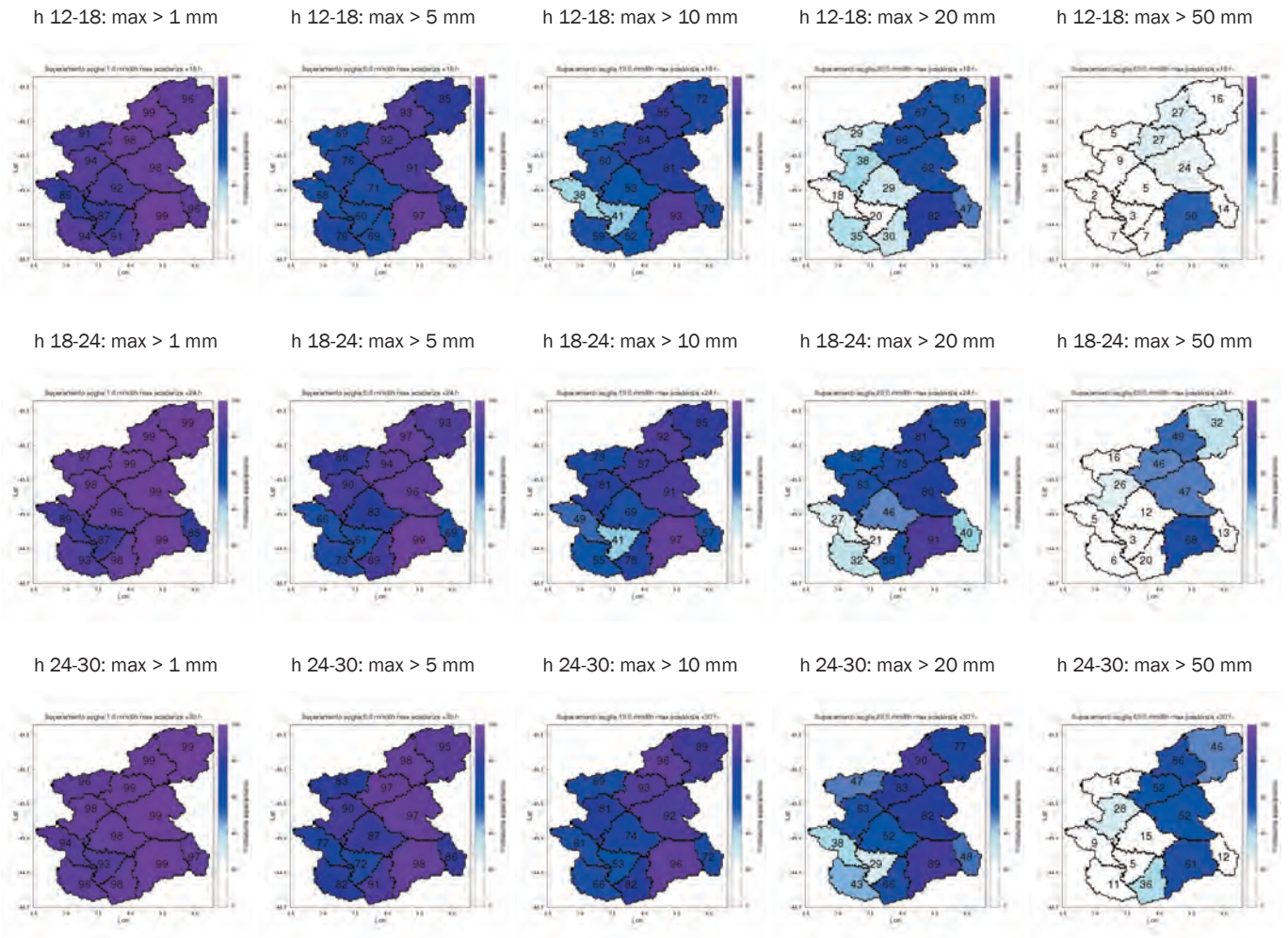


Figura 1.16 - Mappe di probabilità di precipitazione massima sulle aree allertamento emesse il giorno 4 novembre 2011 con il Multimodel SuperEnsemble Dressing e relative agli intervalli di 6 ore successivi a partire dalle 12 del pomeriggio. Le colonne indicano la soglia: 1 mm/6h, 5 mm/6h, 10 mm/6h, 20 mm/6h, 50 mm/6h rispettivamente. Le righe indicano la scadenza previsionale: +12/+18 in alto, +18/+24 al centro, +24/+30 in basso. In ogni area è indicata la probabilità di superamento (%).

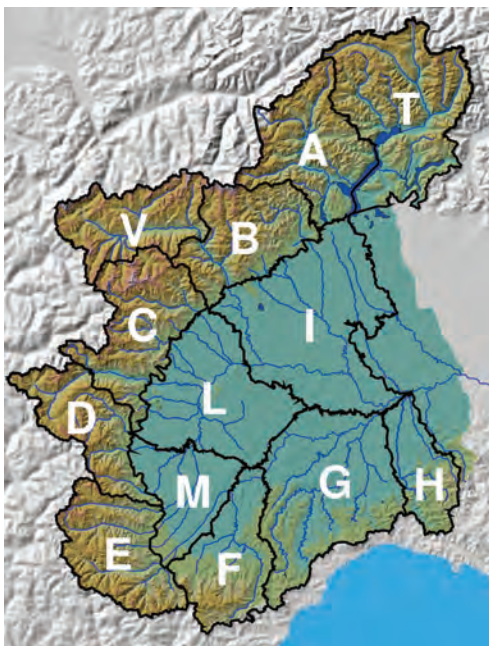


Figura 1.17 - Denominazione delle aree di allertamento del Piemonte, Ticino e Valle d'Aosta.

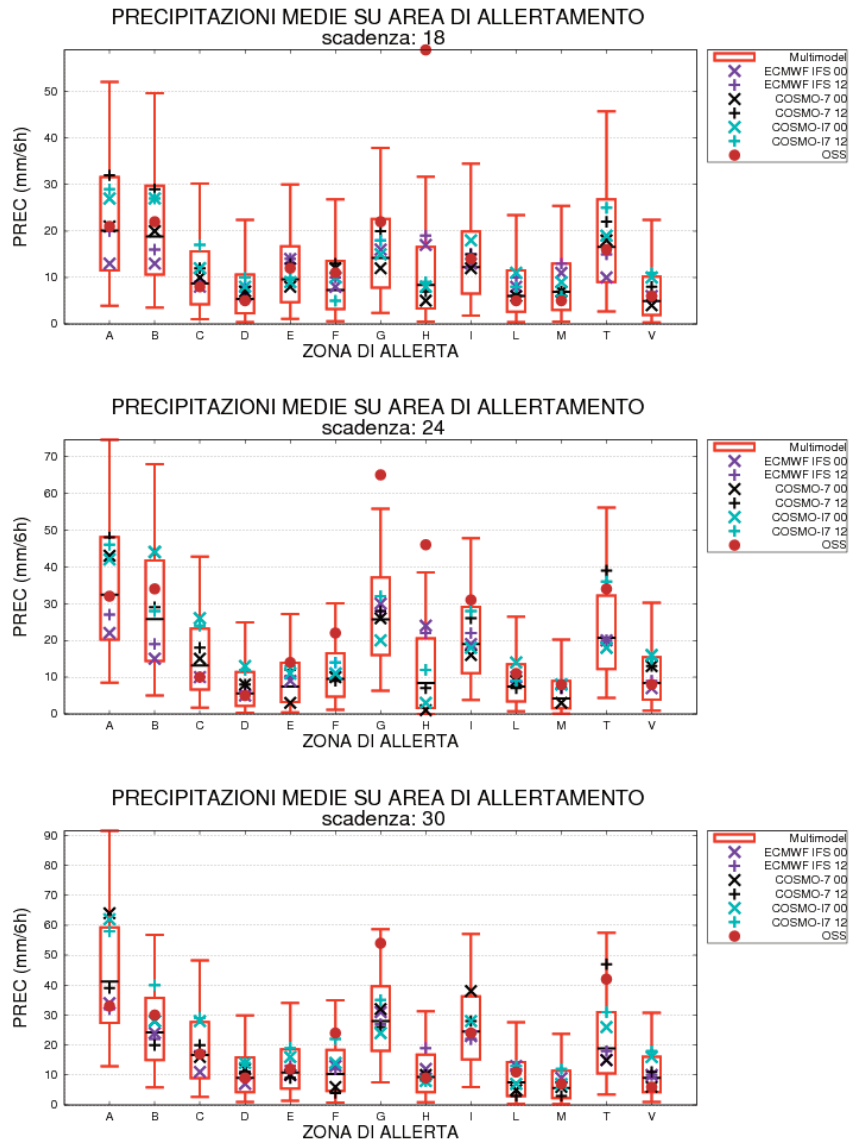


Figura 1.18 - Precipitazioni medie in su 6h sulle aree di allertamento piemontesi e sul Ticino relativa al 4 Novembre 2011. In rosso il boxplot delle previsioni probabilistiche con il Multimodel Dressing (5°, 25°, 50°, 75° e 95° percentile), in viola le previsioni del modello ECMWF, in nero quelle del modello COSMO-7, in azzurro quelle del modello COSMO-17, in marrone i valori osservati. Previsione relativa alle scadenze +12/+18 (in alto), +18/+24 (al centro), +24/+30 (in basso), in analogia alle Figure 1.15 e 1.16. Per la denominazione delle aree di allertamento, si veda Fig. 1.17.

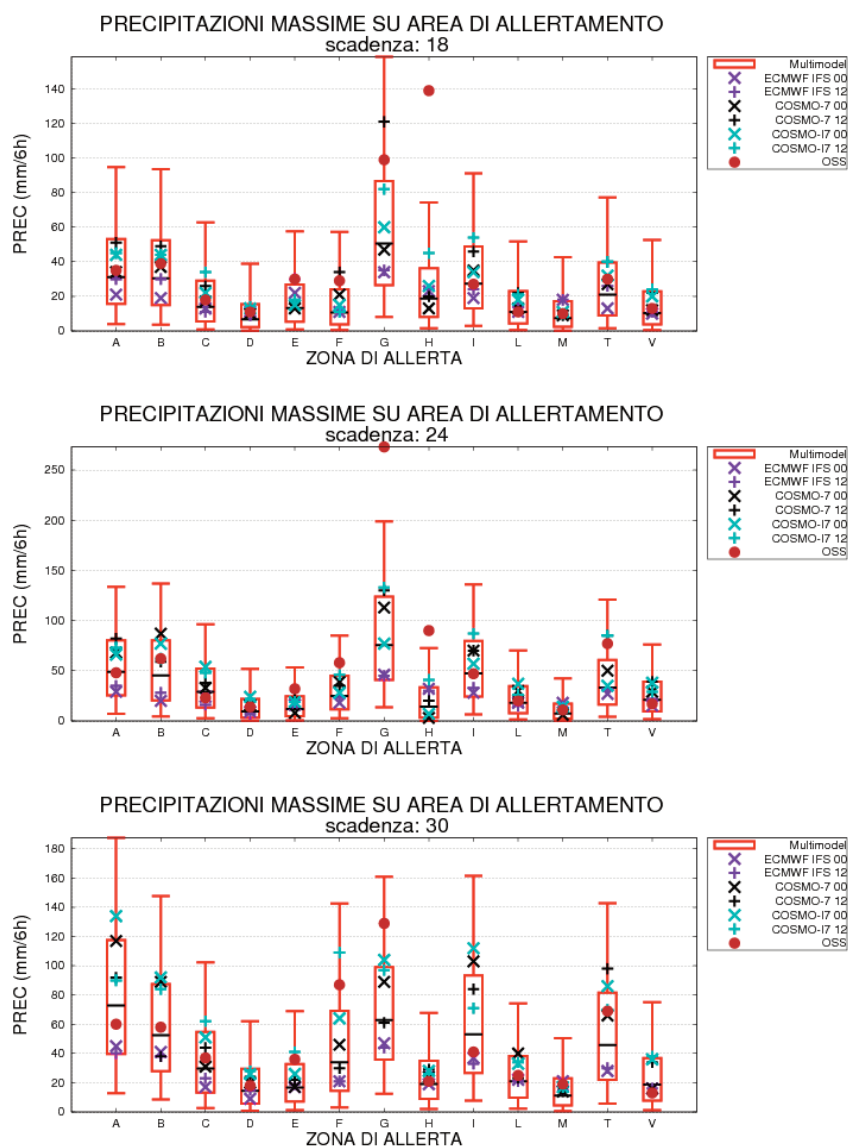


Figura 1.19 - Precipitazioni massime in su 6h sulle aree di allertamento piemontesi e sul Ticino relativa al 4 Novembre 2011. In rosso il boxplot delle previsioni probabilistiche con il Multimodel Dressing (5°, 25°, 50°, 75° e 95° percentile), in viola le previsioni del modello ECMWF, in nero quelle del modello COSMO-7, in azzurro quelle del modello COSMO-17, in marrone i valori osservati. Previsione relativa alle scadenze +12/+18 (in alto), +18/+24 (al centro), +24/+30 (in basso), in analogia alle Figure 1.15 e 1.16. Per la denominazione delle aree di allertamento, si veda Fig. 1.17.

L'analisi delle Figure 1.18 e 1.19 permette di apprezzare il valore aggiunto della precipitazione probabilistica del Multimodel SuperEnsemble Dressing, in quanto le osservazioni ricadono molto spesso all'interno del boxplot (rappresentante il 50% di probabilità di accadimento), dove in generale si posizionano i modelli deterministici ma anche qualora i modelli stiano commettendo consistenti errori di sottostima il Multimodel riesce a catturare l'incertezza relativa, in quanto le osservazioni ricadono entro le barre (che rappresentano l'intervallo di probabilità 5% - 95%). In pochissimi casi (zone G ed H nelle prime due scadenze previsionali) le osservazioni si sono rivelate superiori anche ai limiti del boxplot, cioè si è verificato un evento che per il Multimodel aveva una probabilità inferiore al 5% di accadere. In altre parole, il Multimodel SuperEnsemble Dressing riesce a fornire un valore aggiunto significativo alla previsione dei modelli deterministici di input, a meno che la previsione di questi ultimi non sia, nel loro complesso, completamente sbagliata.

CONCLUSIONI

La progettazione, sperimentazione e realizzazione di sistemi comuni per il monitoraggio e la prevenzione dei rischi naturali con applicazione di tecnologie innovative sono stati il cardine del progetto ed il punto di arrivo delle sue attività. L'azione 1 di FLORA mira a migliorare l'utilizzo operativo di strumenti per la difesa da alluvioni in aree ad orografia complessa, quali le valli alpine italiane e svizzere attraverso il miglioramento della stima della precipitazione alla piccola scala spazio-temporale, indispensabile per la valutazione delle piene dei bacini montani, in termini di previsione.

Per arrivare a tale risultato serve innanzitutto conoscere il territorio e, di conseguenza, gli strumenti a disposizione (modelli meteorologici, rete osservativa). La creazione di uno scambio di dati osservati e di un database comune ha quindi permesso di avere una base indispensabile da cui partire per realizzare gli obiettivi previsti.

Il secondo passo altrettanto importante è stata la condivisione dei modelli numerici di previsione meteorologica, il cui studio e confronto con i dati reali permette di tracciare il comportamento della precipitazione in queste aree topologicamente complesse. Tale studio ha favorito l'individuazione dei punti deboli (e dei punti forti) dei modelli coinvolti, osservandone il comportamento negli anni, verificandone l'affidabilità sia nello spazio che nel tempo, riuscendo anche a cogliere la differenza fra le diverse caratteristiche della precipitazione (estiva-convettiva, invernale-stratiforme, pioggia-neve).

La diretta conseguenza di tutto questo lavoro preparatorio è la possibilità di incrementare il numero di osservazioni da assimilare all'interno di un modello meteorologico, cosa che dovrebbe aumentarne la realistica. Di conseguenza, è lecito provare ad includere i dati osservati condivisi (che hanno una densità paragonabile alla risoluzione reale dei modelli in questione). In particolare, si tratta di osservare come il modello viene perturbato in funzione di quale variabile viene assimilata (temperatura ed umidità a 2 m dal suolo). I risultati di questa attività sperimentale sono stati presentati in convegni scientifici di livello nazionale ed internazionale e sono, in generale, promettenti. E' chiaro che la realizzazione di nuove metodologie di miglioramento della previsione di precipitazione ad altissima risoluzione dei modelli meteorologici ad area limitata risulta fondamentale per l'emissione delle allerte di protezione civile e per la programmazione del monitoraggio del territorio, con l'obiettivo di gestire il rischio idrogeologico.

Per arrivare a tale obiettivo, è possibile agire in parallelo con lo sviluppo di tecniche che agiscano non all'interno del modello stesso, ma cercando di migliorare i suoi risultati correggendone gli errori non durante la simulazione ma in fase successiva (post-processing). Di conseguenza, sono state implementate delle procedure operative che si sono dimostrate robuste e solide, essendo in grado di migliorare effettivamente la previsione di pioggia da un punto di vista probabilistico.

RINGRAZIAMENTI

Per portare a termine un lavoro così ampio ed impegnativo è necessario il coinvolgimento di diverse realtà, sia a livello nazionale che internazionale. In particolare è determinante la sinergia che si viene a creare tra gli enti interessati nel progetto. Pertanto si desidera ringraziare oltre al Consorzio internazionale COSMO per l'utilizzo dei modelli meteorologici operativi, i colleghi di ARPA Lombardia, del Cantone Ticino e di Arpa Piemonte che hanno partecipato ad una o più attività del progetto, garantendone la realizzazione e la buona riuscita.

BIBLIOGRAFIA

Alapaty K., Seaman N. L., Niyogi D. S., Hanna A.F., "Assimilating Surface Data to Improve the Accuracy of Atmospheric Boundary Layer Simulations", *Journal of Applied Meteorology*, 40, 2068-2082, 2001.

Alapaty K., Niyogi D. S., Chen F., Chandrasekar A., Seaman N., "Development of the Flux-Adjusting Surface Data Assimilation System using the MM5 model", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, No. 9, 2331-2350, 2008.

Cane D., Milelli M., "Weather forecasts obtained with a Multimodel SuperEnsemble Technique in a complex orography region", *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 15, No. 2, 207-214, 2006.

Cane D., Milelli M., "Can a Multimodel SuperEnsemble technique be used for precipitation forecasts ?", *Advances in Geoscience*, 25, 17-22, 2010.

Cassardo C., Ji J. J., Longhetto A., "A study of the performances of a land surface process model (LSPM)", *Boundary Layer Meteorology*, 72, 87-121, 1995.

Ebert E. E., McBride J. L., "Methods for verifying quantitative precipitation forecasts: Application to the BMRC LAPS model 24-hour precipitation forecasts", *BMRC Techniques Development Report No. 2*, 87 pp., 1997.

Krishnamurti T. N., Kishtawal, C. M., Larow, T. E., Bachiochi, D. R., Zhang, Z., Williford, C. E., Gadgil, S., Surendran, S., "Improved weather and seasonal climate forecasts from Multimodel Superensemble", *Science*, 285, 1548-1550, 1999.

Milelli M., Turco M., Oberto E., "Screen-level non-GTS data assimilation in a limited-area mesoscale model", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1129-1149, 2010.

Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P., "Numerical Recipes in FORTRAN Fortran 90", Cambridge University Press, 1996.

Schaefer J. T., "The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill. Weather and Forecasting", *Weather and Forecasting*, vol. 5, issue 4, pp. 570-575, 1990.

Stanski H. R., Wilson L. J., Burrows W. R., "Survey of common verification methods in meteorology", *World Weather Watch Tech. Rept. No. 8*, WMO/TD No. 358, WMO, Geneva, 114 pp., 1989.

Wilks D.S., "Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. An Introduction", Academic Press, San Diego, 467 pp., 1995.

2

Stima dei campi di precipitazione da radar mediante validazione con dati provenienti dalla rete pluviometrica



OBIETTIVI

L'uso di misure fornite da radar meteorologici è un valido supporto per la conoscenza della distribuzione spazio-temporale della precipitazione. Tale applicazione, ormai consolidata nelle scienze idrologiche ed altrettanto nelle tecnologie di monitoraggio e preannuncio, è soggetta a vincoli e problematiche connessi al territorio ed allo strumento impiegato. La stima dell'intensità di precipitazione da radar richiede la determinazione di una legge che converta la misura del fattore di riflettività Z in intensità di pioggia R . Le grandezze Z ed R sono legate per il tramite della distribuzione dei diametri delle gocce, $N(D)$, come già riconosciuto da Marshall e Palmer (1948). L'utilizzo di distribuzioni standard dei diametri delle gocce porta ad ottenere leggi di potenza del tipo:

$$Z = a \cdot R^b \quad (2.1)$$

fra dati di riflettività radar (Z) in $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ e di altezza di precipitazione (R) in mm. I coefficienti (a e b) della relazione Z - R dipendono dallo spettro delle gocce $N(D)$. Quest'ultimo dipende a sua volta sia dal tipo di fenomeno in esame sia dalla sua evoluzione. La variabilità di $N(D)$ si traduce pertanto necessariamente in una indeterminazione nella relazione Z - R . I coefficienti a e b vengono perciò usualmente stimati mediante un approccio empirico, basato sull'accoppiamento con misure di pioggia fornite dalla rete pluviometrica (p.es. Ciach and Krajewski, 1999). In letteratura si riportano numerose forme della relazione Z - R , ossia diversi stimatori dei coefficienti a e b (p.es., Marshall and Palmer (1948); Joss and Waldvogel (1970); Woodley et al. (1975)). In relazione all'area piemontese, la relazione Z - R è stata ricalibrata da Alfieri et al. (2010), basandosi su dati pluviometrici raccolti in un'area con raggio 25 km intorno al radar di Bric della Croce. Nel presente lavoro ci si prefigge l'obiettivo di ricalibrare tale relazione utilizzando una base dati più ampia, che comprende un elevato numero di eventi di precipitazione intensa, convettiva o stratiforme, su un'area che include un totale di 378 strumenti di misura a terra (pluviometri). Ulteriore obiettivo del lavoro consiste nella quantificazione dell'incertezza associata alle stime di precipitazione da radar.

1. SELEZIONE DEGLI EVENTI

I criteri che hanno portato alla costruzione del campione di eventi pluviometrici a cui applicare le successive fasi di analisi si rifanno alla necessità di rappresentare al meglio varie manifestazioni di precipitazioni intense sul territorio piemontese, ovvero:

- gli eventi di tipo convettivo, in genere molto localizzati e caratterizzati da intensità elevate e durate brevi;
- gli eventi di tipo stratiforme, più estesi spazialmente e caratterizzati da intensità mediamente più basse e da durate anche pluri-giornaliere.

Il periodo di osservazione entro il quale gli eventi sono stati censiti comprende gli anni tra il 2003 ed il 2008. Allo scopo di selezionare un adeguato numero di eventi per ciascuna delle suddette tipologie, ci si è affidati a criteri di selezione oggettivi. Tali criteri e gli esiti della selezione sono descritti nel seguito.

La scelta degli eventi convettivi deriva dall'analisi dei massimi di precipitazione orari registrati dai 378 pluviometri della rete di Arpa Piemonte fra il 2003 ed il 2008. Per ciascuna data in cui almeno una stazione piemontese avesse registrato un massimo annuo di precipitazione per una data durata, sono state contate le stazioni che avessero a loro volta registrato un massimo di analoga durata. Il conteggio è stato applicato ad alcune durate caratteristiche (10', 20', 30', 1h, 3h, 6h, 12h, 24h). I risultati del conteggio sono riportati nelle Tabelle (2.1-2.6) per tutte le durate e per tutti gli anni.

Gli eventi più significativi nel periodo di osservazione sono stati selezionati secondo un criterio di contemporaneità, ovvero scegliendo date caratterizzate da un elevato numero di stazioni ove fossero registrate precipitazioni massime annue. Per gli eventi di tipo convettivo la durata oraria (quarta colonna di ciascuna tabella) è stata

adottata come durata di riferimento. In particolare, sono stati selezionati quegli eventi durante i quali più di 22 stazioni piemontesi avessero registrato il massimo orario (sottolineati nelle tabelle). La soglia delle 22 stazioni è stata “tarata” al fine di selezionare una decina di eventi in tutto. Le date così individuate sono riportate nella prima colonna della Tabella 2.7. Risultati analoghi in termini di date selezionate si sarebbero ottenuti scegliendo le altre durate inferiori alle 24 ore.

2003		10min	20min	30min	1h	3h	6h	12h	24h
	17-Jun	23	21	23	21	16			
28-Jun		16	15	15					
24-Jul	21	18	18	22	22				
27-Jul	18	24	24	24	15				
8-Sep							16		
9-Sep							27	26	18
20-Oct								15	
31-Oct					28	31			
1-Nov							25	49	60
27-Nov							16	35	
28-Nov									17
3-Dec									64
4-Dec								19	17

Tabella 2.1: Date degli eventi di precipitazione intensa e numero di stazioni con massimo annuo per ciascuna durata caratteristica (anno 2003).

2004		10min	20min	30min	1h	3h	6h	12h	24h
	21-Feb								18
22-Feb							18	16	
30-Apr									20
4-May									17
4-Aug	19	17	17	16	15				
6-Aug	20	21	18						
8-Aug	29	26	21	19					
18-Aug					16	18			
16-Sep					16				
26-Oct					26	33	39	26	
27-Oct									16
2-Nov			16	21	23	30	39	27	
3-Nov									20
30-Nov									16

Tabella 2.2: Date degli eventi di precipitazione intensa e numero di stazioni con massimo annuo per ciascuna durata caratteristica (anno 2004).

2005								
	10min	20min	30min	1h	3h	6h	12h	24h
16-Apr					23	39	46	37
18-May							25	22
14-Jun							15	
4-Jul	19	16	15					
18-Jul	17							
29-Jul	19	20	19					
2-Aug	26	22	28	<u>29</u>	42	44	40	42
20-Aug	21	19	22	<u>23</u>	20	21	16	
21-Aug								
27-Aug		15	15	18	17			
28-Aug							16	
7-Sep					29	35	36	29
9-Sep					20	26	28	49
11-Sep	26	24	20	<u>28</u>	31	27	22	
12-Sep								28
17-Sep				17				
3-Oct								20
3-Dec							27	18

Tabella 2.3: Date degli eventi di precipitazione intensa e numero di stazioni con massimo annuo per ciascuna durata caratteristica (anno 2005).

2006								
	10min	20min	30min	1h	3h	6h	12h	24h
10-May						15		
24-Jun	20	36	15					
6-Jul	41	53	34	36	26			
12-Jul	25	22	28	<u>27</u>				
13-Jul					20	15		
25-Jul	26		25	18				
26-Jul	15		20	16				
16-Aug					21	20		
14-Sep				17	52	66	77	
15-Sep	18		21	<u>32</u>	71	118	144	273
25-Sep							15	15

Tabella 2.4: Date degli eventi di precipitazione intensa e numero di stazioni con massimo annuo per ciascuna durata caratteristica (anno 2006).

2007								
	10min	20min	30min	1h	3h	6h	12h	24h
2-May					31	34	46	38
4-May					15	23	16	
14-May						17	17	
28-May							18	21
5-Jun	17	17	18					
7-Jun						15	39	58
15-Jun	17	20	28	<u>29</u>	20	17	23	22
8-Aug	55	55	56	<u>56</u>	54	54	34	
9-Aug								22
20-Aug	17			15				
22-Aug								16
30-Aug	28	32	35	<u>34</u>	31			
31-Aug				17	20	42	43	32
26-Sep							24	
26-Oct								30
23-Nov							19	25

Tabella 2.5: Date degli eventi di precipitazione intensa e numero di stazioni con massimo annuo per ciascuna durata caratteristica (anno 2007).

2008								
	10min	20min	30min	1h	3h	6h	12h	24h
12-Jan						16	33	38
21-Apr							17	18
17-May		15		17	20			
18-May							15	19
20-May							16	
26-May								22
27-May	20	22	23	22				
29-May	54	60	60	57	56	57	67	42
30-May				21	20			43
17-Jun	17							
29-Jun	16	16						
1-Jul	15	15						
29-Jul	27	23	18					
12-Jul	19							
13-Jul	18	20	19	17				
6-Sep						15		
7-Sep							16	
13-Sep							17	
4-Nov							25	
5-Nov								54

Tabella 2.6: Date degli eventi di precipitazione intensa e numero di stazioni con massimo annuo per ciascuna durata caratteristica (anno 2008).

N.Evento	Eventi convettivi	N.Evento	Eventi Stratiformi
1	27/07/2003	9	31/10-01/11/2003
2	02/08/2005	10	25/10-02/11/2004
3	20/08/2005	11	15/04-17/04/2004
4	06/07/2006	12	06/09-12/09/2005
5	12/07/2006	13	14/09-15/09/2006*
6	08/08/2007	14	01/05-04/05/2007*
7	20/08/2007	15	25/05-28/05/2007
8	29/05/2008*	16	28/10-06/11/2008
		17	01/12-04/12/2003*
		18	16/12-17/12/2008*

Tabella 2.7: Date di evento. L'asterisco indica gli eventi in corrispondenza dei quali è anche disponibile un rapporto d'evento redatto da Arpa Piemonte.

La selezione degli eventi a carattere stratiforme si basa invece sulle serie di precipitazione giornaliera ragguagliata su 21 macro-bacini piemontesi nel periodo 2003-2008 (Figura 2.1).

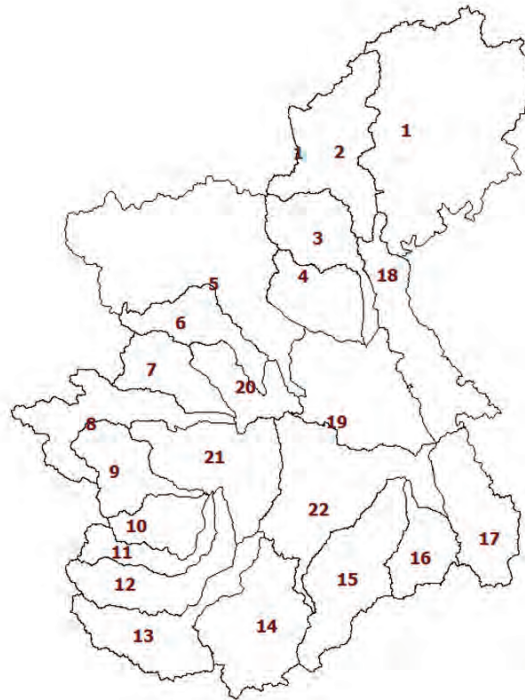


Figura 2.1: Macro-bacini in cui è suddivisa la Regione Piemonte

In questo caso la selezione degli eventi più importanti è stata effettuata in base al numero di bacini interessati contemporaneamente dai massimi annui di precipitazione giornaliera e bi-giornaliera. In particolare sono stati identificati come eventi di interesse quelli durante i quali almeno 5 bacini piemontesi avessero registrato il massimo di precipitazione giornaliera e/o bi-giornaliera.

In Tabella 2.8 sono riportati, per ciascun anno e per ciascuna data in cui il massimo di precipitazione (bi)giornaliera sia stato osservato in almeno un bacino, il numero di bacini contemporaneamente coinvolti dalla precipitazione. Gli eventi così selezionati sono presumibilmente di carattere stratiforme poiché interessano più bacini contemporaneamente. Le durate effettive (in giorni) degli eventi, definite ispezionando le serie di precipitazione, sono riportate nella seconda colonna della Tabella 2.8.

2003		2004		2005	
Giorno	Numero bacini interessati	Giorno	Numero bacini interessati	Giorno	Numero bacini interessati
29/08/2003	1	21/02/2004	3	16/04/2005	9
09/09/2003	1	09/04/2004	1	02/08/2005	4
31/10/2003	9	29/04/2004	1	27/08/2005	1
24/11/2003	1	03/05/2004	1	07/09/2005	1
27/11/2003	1	05/05/2004	2	08/09/2005	1
02/12/2003	7	26/10/2004	5	11/09/2005	5
04/12/2003	2	28/10/2004	3	02/10/2005	1
		01/11/2004	1		
		02/11/2004	4		
		29/11/2004	2		
2006		2007		2008	
Giorno	Numero bacini interessati	Giorno	Numero bacini interessati	Giorno	Numero bacini interessati
16/08/2006	1	23/01/2007	1	17/05/2008	1
14/09/2006	17	04/04/2007	1	29/05/2008	3
15/09/2006	3	02/05/2007	8	02/11/2008	1
25/09/2006	1	25/05/2007	5	04/11/2008	13
		01/06/2007	1	05/11/2008	1
		06/06/2007	7	29/11/2008	1
		15/06/2007	2	15/12/2008	1
		23/11/2007	1	16/12/2008	8

Tabella 2.8: Giorni di occorrenza dei massimi di precipitazione (bi)giornaliera nei 21 bacini piemontesi e numero di bacini interessati contemporaneamente dall'evento. Sono evidenziate le date in cui il massimo è stato registrato in almeno 5 bacini.

Le date riportate in Tabella 2.7 sono state confrontate, a posteriori, con gli eventi per i quali erano stati redatti da parte di Arpa Piemonte dei rapporti d'evento. Questo confronto mira a verificare l'efficacia della procedura nell'identificazione degli eventi più gravosi nel periodo 2003-2008. Gli eventi, tra quelli selezionati, per i quali è disponibile il rapporto d'evento sono contrassegnati con un asterisco in Tabella 2.7. Non deve preoccupare il fatto che non tutti gli eventi siano corredati da un rapporto specifico dal momento che i rapporti d'evento vengono redatti in corrispondenza di eventi alluvionali in presenza di danni, non necessariamente legati ad eventi meteorici intensi. Per lo stesso motivo non desta sospetto il fatto che due casi con annesso rapporto d'evento nel periodo 2003-2008 non siano inclusi tra gli eventi selezionati per questo studio.

Il reperimento dei dati di riflettività radar, per ciascun evento selezionato e in corrispondenza della posizione di ogni stazione pluviometrica, ha comportato la necessità di accedere all'intero database di misure radar (in dBZ, con dettaglio temporale di 10 minuti) nel periodo di riferimento. L'operazione ha portato alla disponibilità di mappe complete di riflettività su tutta la regione coperta dal radar di Bric della Croce.

L'accoppiamento delle mappe con le misure di stazione, ovvero la selezione per ciascun istante e per ciascuna stazione delle coppie di dati Z-R, è poi stato ottenuto interfacciando le due categorie di dati tramite un GIS.

2. COSTRUZIONE E SCELTA DELLA MAPPA DI VISIBILITÀ

2.1 Caso della cumulata non-stagionale

Prima di procedere all'esame della relazione Z-R si è esaminata l'eventualità di una sistematica sottostima in zone "coperte" da rilievi. Lo scopo era di escludere tali zone dalla fase di taratura della relazione Z-R. Per ciascun punto della regione sono state utilizzate: la distanza dal radar, l'altezza del raggio inferiore (quota_{RA}) e la quota del terreno (quota), entrambe in m s.l.m. Da queste si ricava l'altezza minima del raggio sul suolo (quota_{RR}= quota_{RA}-quota). Tali caratteristiche nel seguito saranno identificate col termine "descrittori".

La determinazione dell'eventuale sottostima sistematica è avvenuta mediante calcolo della precipitazione cumulata P_{pluvio} nei 378 pluviometri nel periodo compreso tra il 16/09/2009 e il 16/02/2011, considerando solo le 346 stazioni che presentano meno del 2% di giorni di avaria. Questo campo di precipitazione cumulata è stato confrontato con la cumulata Pradar, ottenuta convertendo i dati di riflettività radar con la relazione di Joss e Waldvogel (1970) in corrispondenza dei 346 punti di misura, e poi cumulando le precipitazioni stimate. Per determinare l'entità della sottostima serve una iniziale taratura in zone ad elevata visibilità. La zona di taratura preliminare include stazioni entro i 50 km dalla sorgente e contemporaneamente comprese nella zona dove la quota del raggio assoluta sia ≤ 1500 m. Entro tale zona ricadono 58 delle 378 stazioni incluse nella base di dati. In Figura 2.2.a è riportato il digramma di dispersione delle Pradar nei confronti delle P_{pluvio}.

Si osserva che tutti i punti si posizionano al di sotto della bisettrice del grafico, da cui la necessità, prima di procedere ad ulteriori analisi, di rimuovere la distorsione, imponendo il rispetto della media dei valori di precipitazione. Il fattore di correzione della distorsione F è ottenuto come rapporto tra la media delle cumulate P_{pluvio} e Pradar sulle 58 stazioni. Ne è risultato un valore pari a 1.65. Applicando il fattore di correzione della distorsione a tutte le stazioni incluse nel database si ha il grafico riportato in Figura 2.2.b, da cui risulta evidente l'entità della sottostima nella precipitazione totale ottenuta trasformando la riflettività con la relazione di Joss e Waldvogel (1970).

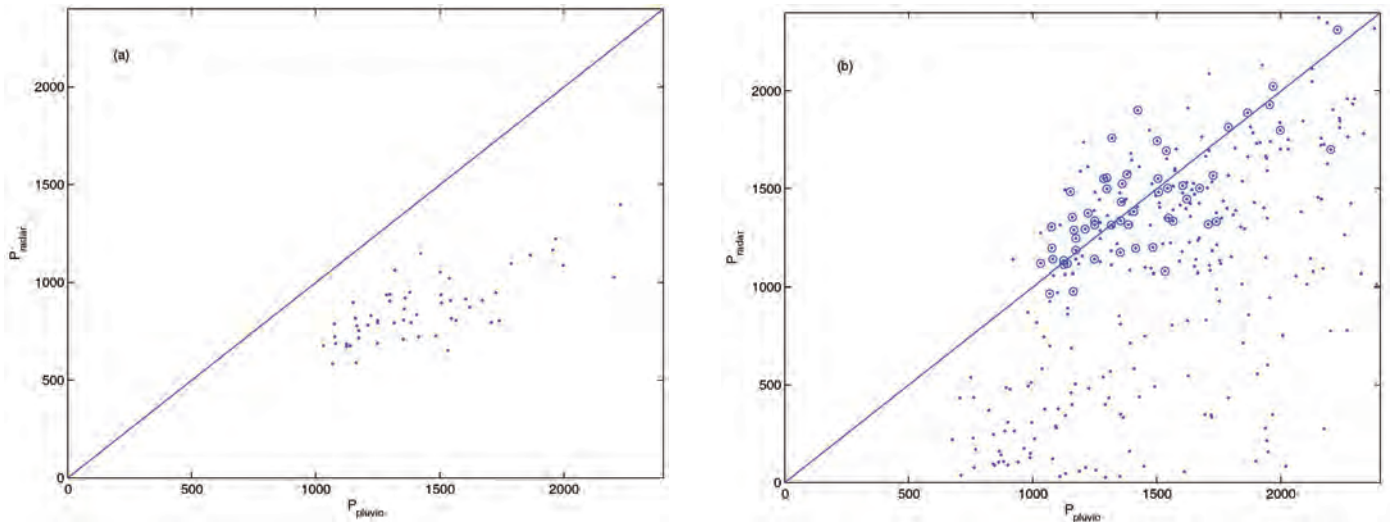


Figura 2.2: a) diagramma di dispersione delle P_{radar} nei confronti delle P_{pluvio} nelle 58 stazioni appartenenti alla zona di taratura; b) diagramma di dispersione delle P_{radar} nei confronti delle P_{pluvio} nelle 346 stazioni appartenenti alla rete pluviometrica piemontese. I punti cerchiati rappresentano le stazioni nella zona di taratura.

Stabilita la correzione che determina il rispetto della media spaziale dei valori di precipitazione, si applica tale correzione al segnale rilevato in tutta la regione ottenendo il valore dell'errore assoluto (ϵ_{ass}) e relativo (ϵ_{rel}) in corrispondenza di ciascun punto stazione come:

$$\epsilon_{\text{ass}} = \left| P_{\text{pluvio}} - F \cdot P_{\text{radar}} \right| \quad \text{con } F = 1.66 \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{\text{rel}} = \frac{\epsilon_{\text{ass}}}{P_{\text{pluvio}}}$$

La mappa degli errori relativi nelle 346 stazioni che soddisfano la condizione sui giorni di avaria è riportata nella Figura 2.3.

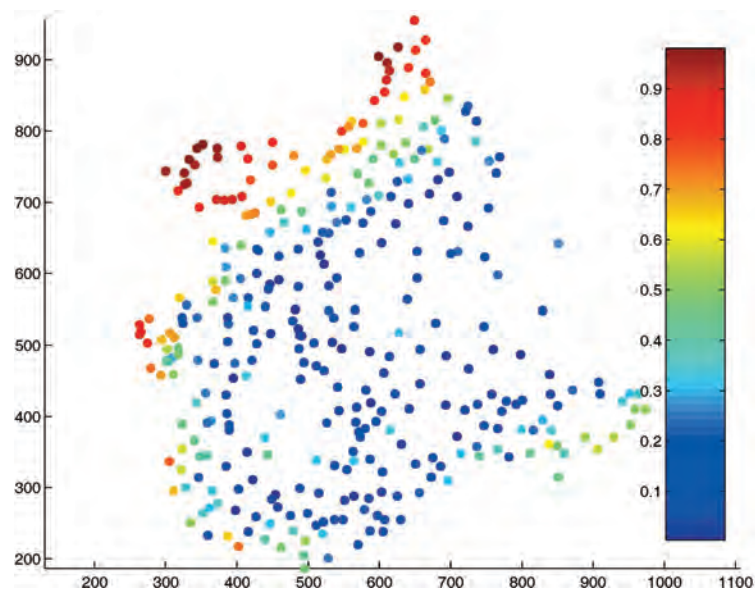


Figura 2.3: Mappa degli errori relativi nelle stazioni analizzate

Si è successivamente verificato che gli errori relativi risultano significativamente (ma non contemporaneamente) correlati con 3 dei 4 descrittori elencati precedentemente (quota, quota raggio assoluta e quota raggio relativa), mentre la distanza non risulta essere un descrittore significativo. Le relazioni che descrivono la variabilità spaziale dell'errore sono:

$$\hat{\varepsilon}_{\text{rel}} = -0.08 + \frac{0.13}{1000} \text{quota} + \frac{0.17}{1000} \text{quota}_{\text{RR}} \quad R^2 = 0.78 \quad \text{oppure} \quad (2.2)$$

$$\hat{\varepsilon}_{\text{rel}} = -0.08 + \frac{0.15}{1000} \text{quota}_{\text{RA}} \quad R^2 = 0.78$$

Si osserva che tali relazioni sono del tutto equivalenti tra loro, essendo valida la relazione $\text{quota} = \text{quota}_{\text{RA}} - \text{quota}_{\text{RR}}$. Viene quindi selezionata la seconda delle due per semplicità. Tale relazione consente, in base all'entità dell'errore 'accettabile', di decidere quale altezza del raggio costituisca la soglia di inclusione delle stazioni nelle fasi di elaborazione successive. O viceversa, data un'altezza del raggio accettabile, di stabilire la soglia di errore. Inoltre essa consente di ricostruire i valori di ε_{rel} in ogni punto del territorio a meno di una componente di errore.

In Figura 2.4 sono rappresentati i residui, ottenuti come differenza tra l'errore ottenuto con la relazione (2.1) e quello derivante dall'applicazione della seconda delle (2.2), ovvero $r = \varepsilon_{\text{rel}} - \hat{\varepsilon}_{\text{rel}}$

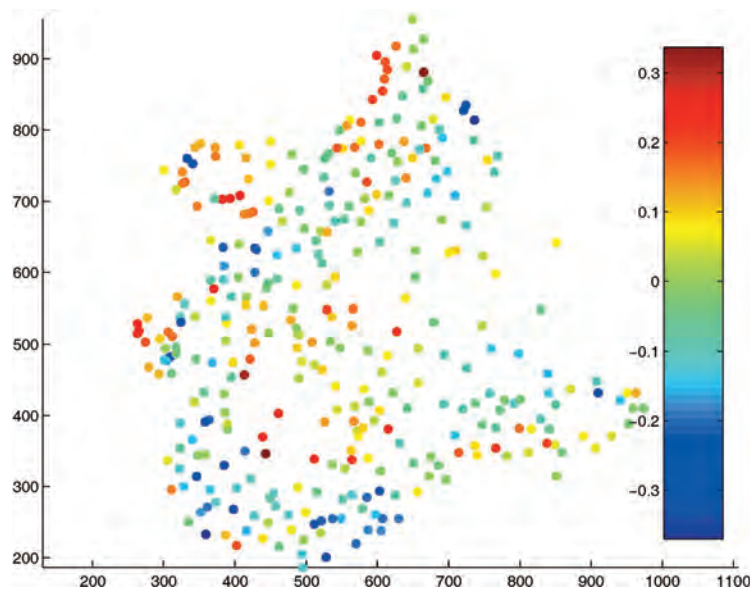


Figura 2.4: Mappa dei residui nei punti stazione.

Nella Tabella 2.9 sono riportati, al variare delle quote_{RA}, i valori di soglia di errore, il numero di pluviometri (IN) compresi nella zona di accettazione relativa alla soglia ($\hat{\epsilon}_{rel} < \epsilon_{soglia}$), il numero di pluviometri (tra quelli inclusi) aventi un valore reale di ϵ_{rel} maggiore del valore di soglia, ed il numero di pluviometri (tra quelli esclusi) aventi un valore reale di ϵ_{rel} minore del valore di soglia.

QuoteRA	ϵ_{soglia}	Pluviometri IN	IN soprasoglia	OUT sottosoglia
2000	0,22	159	28	33
2100	0,23	163	23	34
2200	0,25	166	17	35
2300	0,26	169	18	41
2400	0,28	177	16	36
2500	0,29	180	16	37
2600	0,31	190	14	32
2700	0,32	199	14	30
2800	0,34	206	9	29
2900	0,35	214	12	28
3000	0,36	218	12	29
3100	0,38	221	8	30
3200	0,39	227	8	27
3300	0,41	231	8	26
3400	0,42	240	10	22
3500	0,44	244	12	23
3600	0,45	250	10	22
3700	0,47	257	11	19
3800	0,48	261	10	19
3900	0,50	264	8	23
4000	0,51	269	9	22
4100	0,53	282	12	16
4200	0,54	290	11	11
4300	0,56	301	15	8
4400	0,57	307	17	7
4500	0,59	314	20	6

Tabella 2.9: Variazioni della soglia di errore al variare della quota assoluta del raggio

In Figura 2.5 (grafico di sinistra) sono riportati gli andamenti, al variare della soglia, del numero di pluviometri nella zona di accettazione (in rosso), del numero di pluviometri (tra quelli inclusi) aventi un valore reale di ϵ_{rel} maggiore del valore di soglia (in nero, linea continua) e del numero di pluviometri (tra quelli esclusi) aventi un valore reale di ϵ_{rel} minore del valore di soglia (in nero, linea tratteggiata).

Sulla base di questi andamenti, tenuto conto della necessità di salvaguardare quanta più informazione possibile, pur escludendo le zone a scarsissima visibilità, si è selezionato come valore di soglia ϵ_{soglia} , corrispondente ad una quota assoluta del raggio pari a 4000 m. Tale valore costituisce un buon compromesso tra l'entità dell'errore accettato, il numero di pluviometri inclusi correttamente (269 su 378) e il numero di pluviometri inclusi con errore superiore alla soglia (9).

Le cumulate empiriche degli errori (di stazione) dentro e fuori la zona di accettazione, sono indicate (rispettivamente in rosso e in blu) in Figura 2.5, grafico di destra. La linea tratteggiata orizzontale indica il valore di errore scelto come soglia tra la zona di inclusione e quella di esclusione. Coerentemente con quanto riportato in Tabella 2.1, l'intersezione tra la curva blu e la linea orizzontale si ha in corrispondenza dei 22 pluviometri esclusi con errore effettivo sottosoglia. Analogamente, all'intersezione tra la curva rossa ed il valore di soglia si ritrova il numero di pluviometri inclusi (9) nonostante presentino un errore effettivo superiore alla soglia.

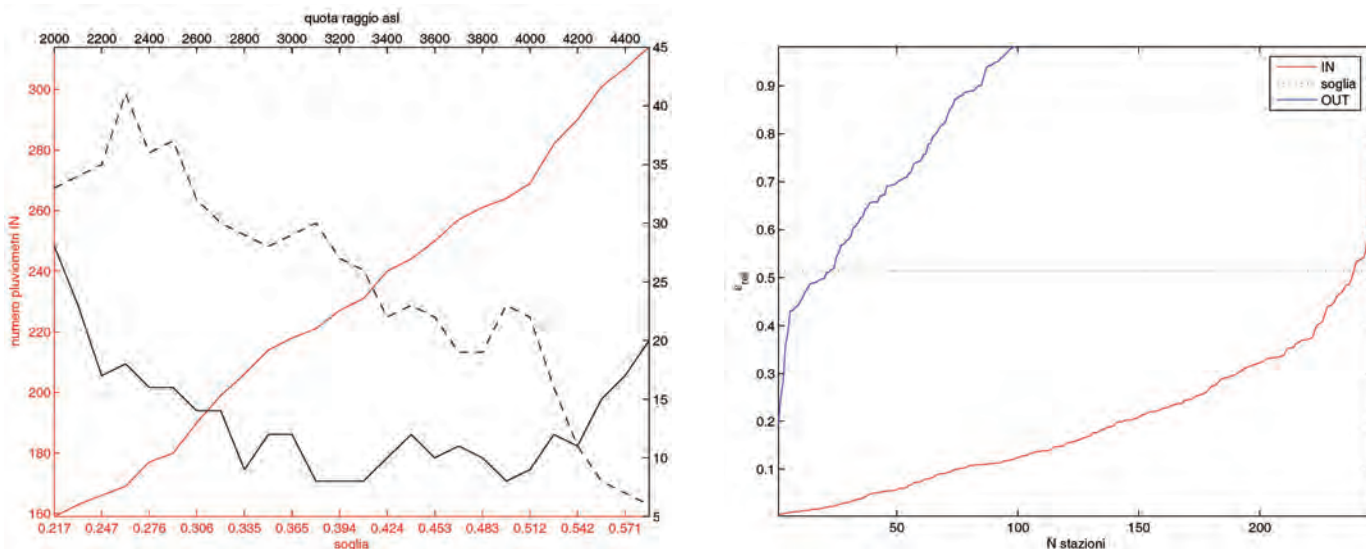


Figura 2.5: Sinistra - numero di pluviometri dentro e fuori la zona di accettazione al variare della soglia; Destra - cumulate empiriche degli errori (di stazione) dentro e fuori la zona di accettazione indicate rispettivamente in rosso e in blu

Sulla base di tale valore di soglia si delinea l'area di accettazione riportata in Figura 2.6, ovvero la zona entro la quale il fascio radar non supera mai la quota 4000 m s.l.m.

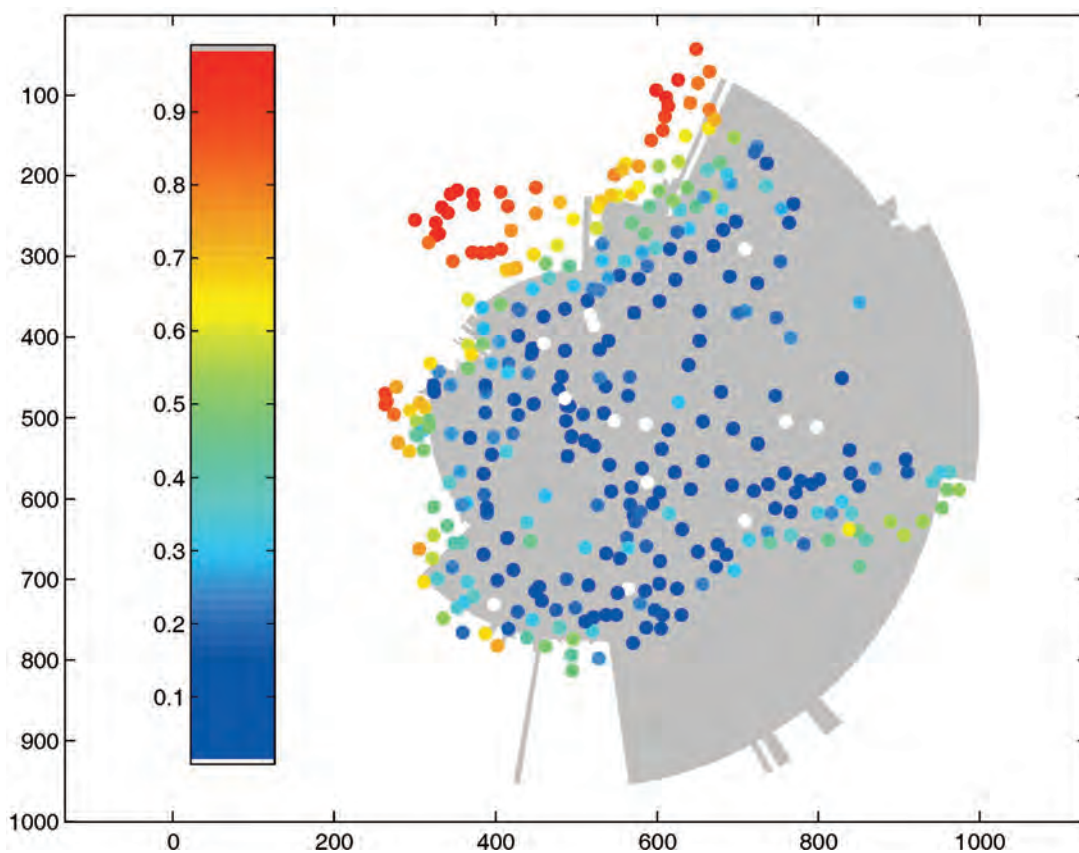


Figura 2.6: Zona di accettazione con errori relativi (di stazione)

2.2 Caso della cumulata stagionale

La sequenza di operazioni descritta nella sezione precedente per il caso della cumulata non stagionale è stata applicata anche al caso della sola stagione estiva, con l'obiettivo di verificare se e come variasse la zona di accettazione. Questa è stata indicata in Figura 2.7 nel caso di analisi dei soli eventi estivi. Le considerazioni che portano a valutare questa seconda ipotesi attengono alla possibilità che l'errore di stima possa dipendere in buona parte dall'occorrenza di precipitazione in forma nevosa.

Il valore della distorsione F , che si ottiene comparandole due cumulate P_{pluvio} e P_{radar} riferite al periodo aprile-settembre 2011 nei 58 punti stazione prossimi al radar, risulta pari a 1.41. Tale valore è effettivamente più basso di quello ottenuto nel caso della cumulata non stagionale, come evidenziato anche dalla minor dispersione dei punti in Figura 2.7 intorno alla bisettrice.

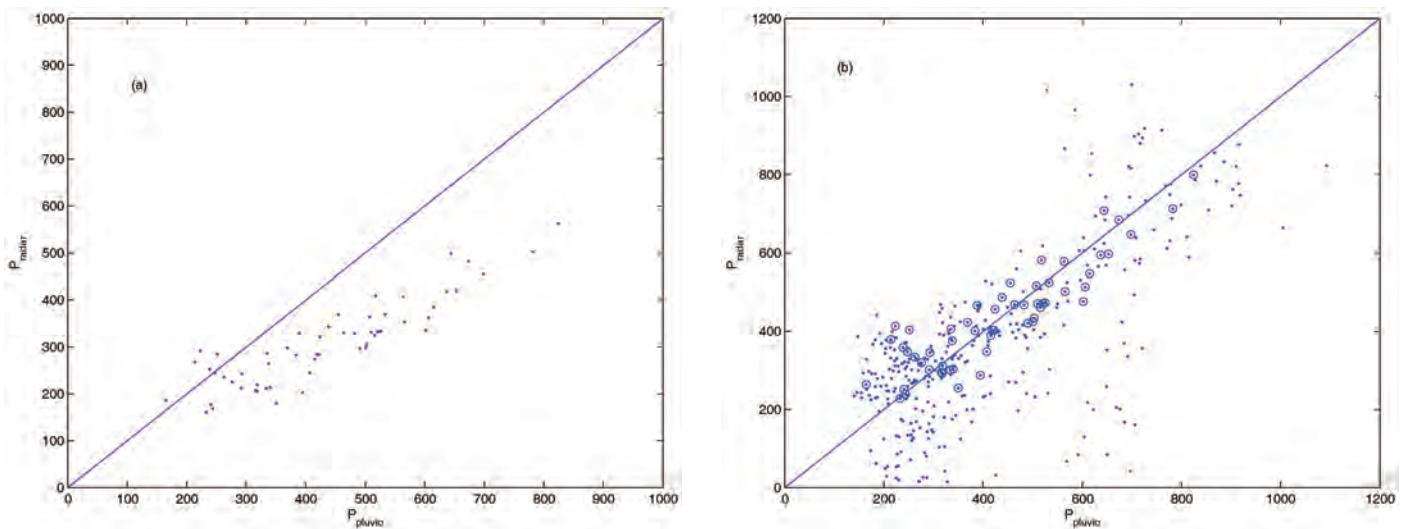


Figura 2.7: come figura 2.1, ma per i soli eventi estivi.

Analogamente a quanto illustrato per il caso non stagionale, stabilita la correzione che determina il rispetto della media spaziale dei valori di precipitazione, si applica tale correzione al segnale di tutta la regione ottenendo il valore dell'errore assoluto (ϵ_{ass}) e relativo (ϵ_{rel}) in corrispondenza di ciascun punto stazione. Gli errori relativi risultano ancora significativamente correlati alla quota assoluta del raggio, analogamente a quanto riportato nella relazione (2.2). Il coefficiente di determinazione risulta però sensibilmente più basso, pari a 0.17. La relazione non è stata pertanto giudicata sufficientemente robusta da poter essere applicata in ricostruzione per la stima dei valori di ϵ_{rel} . Questo risultato è probabilmente legato alla scarsa correlazione spaziale ed alla minore stratificazione verticale degli eventi estivi.

3. TARATURA DELLA RELAZIONE Z-R

L'obiettivo principale dell'attività di ricerca è la determinazione di una coppia di parametri (a,b) che permetta di fornire, attraverso la relazione (1.1), una buona stima della precipitazione sia a livello di singola stazione sia a scala d'evento. In principio l'analisi si è concentrata sulla ricerca della migliore corrispondenza tra la precipitazione osservata e la precipitazione stimata, andando a confrontare le singole registrazioni rilevate ogni 10 minuti. In seguito si è tenuto conto, per la ricerca dei valori ottimali, anche della necessità di minimizzare lo scarto tra la precipitazione cumulata stimata e osservata.

3.1 Procedura di calcolo

Step1.

Una prima stima dei valori ottimali dei coefficienti a e b della relazione (1.1) è ottenuta attraverso una regressione non lineare, che minimizza il valore assoluto dello scarto tra precipitazione stimata (R) e precipitazione osservata (R_{oss}).

$$ABS = \sum_{i=1}^d \left| \left(\frac{\widehat{R}_i}{6} - R_{obs_i} \right) \right| \quad (3.1)$$

dove d è il numero totale di registrazioni per evento.

A partire dalla misura di riflettività in dBZ, ricavata in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica con dettaglio temporale di 10 minuti, si stima un'intensità di precipitazione al suolo usando la relazione (1.1). La precipitazione stimata viene calcolata per ogni possibile coppia di parametri (a,b) all'interno dell'intervallo di ricerca (Tabella 2.10) e confrontata con la corrispondente misura di precipitazione osservata al suolo.

Parametro	Minimo	Massimo
a	1	1000
b	1	4

Tabella 2.10: spazio parametri per la taratura della relazione ZR

Si seleziona poi la coppia di parametri in corrispondenza della quale si minimizza lo scarto assoluto. Per diminuire i tempi di elaborazione, molto elevati a causa del numero di dati e dell'alto dettaglio temporale, si è scelto di utilizzare la tecnica di pre-elaborazione dei dati denominata "data binning": i valori di riflettività radar sono raccolti in classi, con ampiezza minima pari alla risoluzione del dato radar (0.5 dBZ); come valore rappresentativo della classe viene scelto quello centrale dell'intervallo e l'ampiezza delle classi è variabile in funzione del numero di elementi per classe. Classi con meno di 10 elementi (le code della distribuzione) sono state unite insieme per incrementare la robustezza degli stimatori. A ogni classe di riflettività Z viene associato un valore di precipitazione R pari alla media, tra gli elementi appartenenti alla classe, dei valori di precipitazione osservata al suolo. Un esempio di data binning applicato a classi di ampiezza variabile è riportato in Figura 2.8

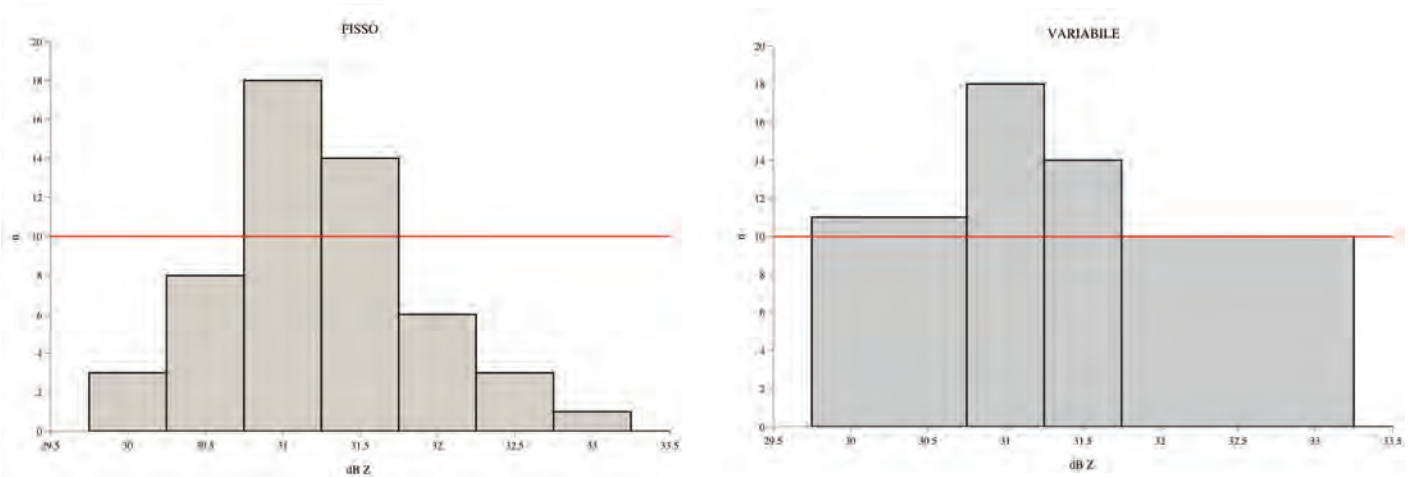


Figura 2.8: Esempio di “data binning”. A sinistra passo uniforme, a destra passo variabile con soglia di almeno 10 misure per classe.

Confrontando la precipitazione stimata dal valore di riflettività rappresentativo di ogni classe con il valore medio della precipitazione osservata, l'operazione di stima dei parametri per i quali lo scarto assoluto è minimo si semplifica notevolmente, andando inoltre a ridurre l'effetto di eventuali errori locali di misura sui dati a 10 minuti.

Step2.

A partire dai coefficienti ottenuti nello Step1 si individuano le coppie di valori a e b (sub-minimi) per cui lo scarto assoluto (ABS) è fino a due volte maggiore del valore minimo. In questo modo si definisce un'area per la ricerca dei parametri, tra quelli ottimi a scala di dettaglio, che meglio riescono a ricostruire la precipitazione cumulata lavorando a scala d'evento. Su ogni stazione, per l'intera durata dell'evento, viene calcolato il valore dello scarto tra le cumulate di pioggia stimata e osservata, per ogni valore della coppia (a,b) appartenente all'area dei sub minimi. Si arriva così a definire un valore del BIAS secondo la relazione (3.1).

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \sum_{i=1}^d \left(\frac{\widehat{R}_{i,j}}{6} - R_{obs\ i,j} \right) \right| \quad (3.2)$$

dove n è il numero di stazioni considerate e d il numero di registrazioni per stazione.

Il valore minimo del BIAS indica per quali coefficienti a e b, appartenenti ai sub minimi, risulta migliore la stima della precipitazione cumulata su stazione.

Step3.

In base ai valori dello scarto assoluto (ABS) e del BIAS calcolato sui sub minimi, si definiscono due indici I_1 e I_2 :

$$I_1 = \left(\frac{ABS}{\min(ABS)} - 1 \right) * 100 \quad (3.3)$$

$$I_2 = \left(\frac{BIAS}{\min(BIAS)} - 1 \right) * 100 \quad (3.4)$$

Questi due indici sono stati successivamente combinati insieme per definire un terzo indice I_3 :

$$I_3 = I_1 + I_2 \quad (3.5)$$

L'indice I_3 tiene quindi conto sia della qualità della stima di dettaglio su ogni singolo dato a 10 minuti sia della stima a scala di evento sulla precipitazione cumulata su ogni stazione. Ricercando il minimo per l'indice I_3 si ottengono i valori ottimali dei coefficienti a e b della relazione (1.1).

3.2 Analisi dei risultati

Per ognuno dei 18 eventi presi in considerazione sono stati stimati i valori ottimali dei coefficienti a e b secondo la procedura descritta in precedenza, andando a ricercare prima il minimo degli scarti assoluti e successivamente, su un'area ristretta intorno a questo valore, il minimo dello scarto tra precipitazioni cumulate osservate e stimate. In Figura 2.9 è riportato, a titolo d'esempio, il risultato ottenuto per l'evento convettivo del 30 agosto 2007. Nella Figura 2.9a sono rappresentate le ellissi d'errore dello scarto assoluto nello spazio parametri, e in grigio, le coppie dei sub minimi dove questo scarto è al più pari al doppio dello scarto minimo. Si vede come l'errore assuma una forma molto allungata e appiattita, dove risulta non immediata e semplice la definizione di un minimo univoco. Sono inoltre riportati in figura i valori del minimo dello scarto assoluto (+), del bias (o) e delle indice I_3 (*).

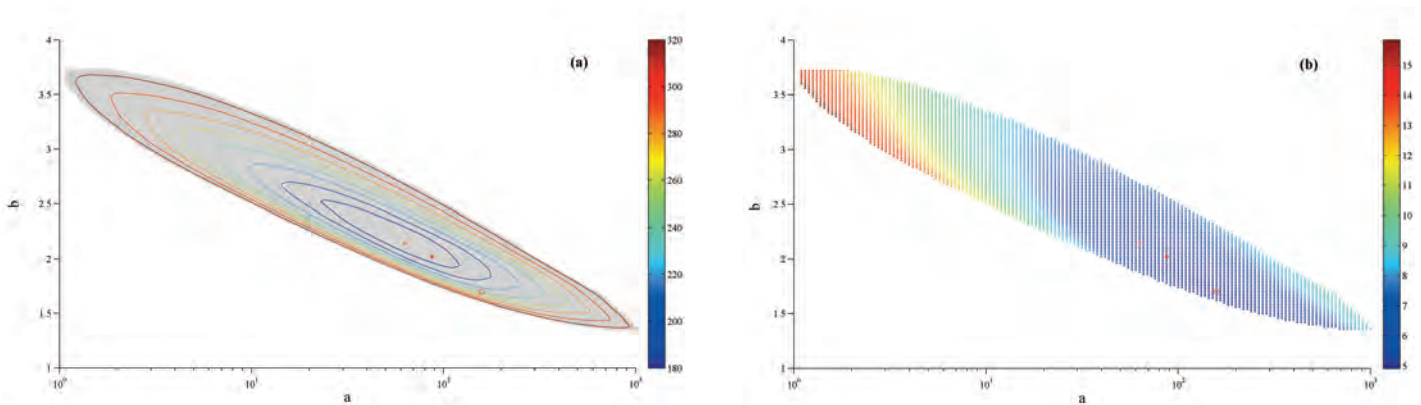


Figura 2.9: Rappresentazione dell'errore assoluto (a) e del bias calcolato sui sub minimi (b).

La distribuzione della distorsione sull'area dei sub minimi è rappresentata nella Figura 2.9b. Si può osservare come i valori più bassi si trovino sul quadrante in basso a destra dello spazio parametri, per valori più alti di a e valori di b ridotti. Il minimo dell'indice I_3 , identificativo dei coefficienti ottimali, si localizzerà quindi, generalmente, a destra dello scarto assoluto minimo.

I valori ottimali di a e b determinati per gli 8 eventi convettivi e i 10 eventi stratiformi considerati nel presente studio (Tab 2.7) sono rappresentati in Figura 2.10. E' possibile vedere come i due eventi (17,18) occorsi nei mesi di dicembre 2003 e 2008 siano considerevolmente isolati e incongruenti rispetto agli altri probabilmente a causa della presenza di precipitazione nevosa che non permette un confronto tra riflettività radar e precipitazione misurata al suolo. La Figura 2.10 mostra inoltre come sia impossibile distinguere un comportamento differente per gli eventi convettivi e per gli eventi stratiformi. Data la particolare distribuzione spaziale dei coefficienti a e b si è scelto di operare, nella ricerca dei valori ottimali, considerando tutti gli eventi insieme (21).

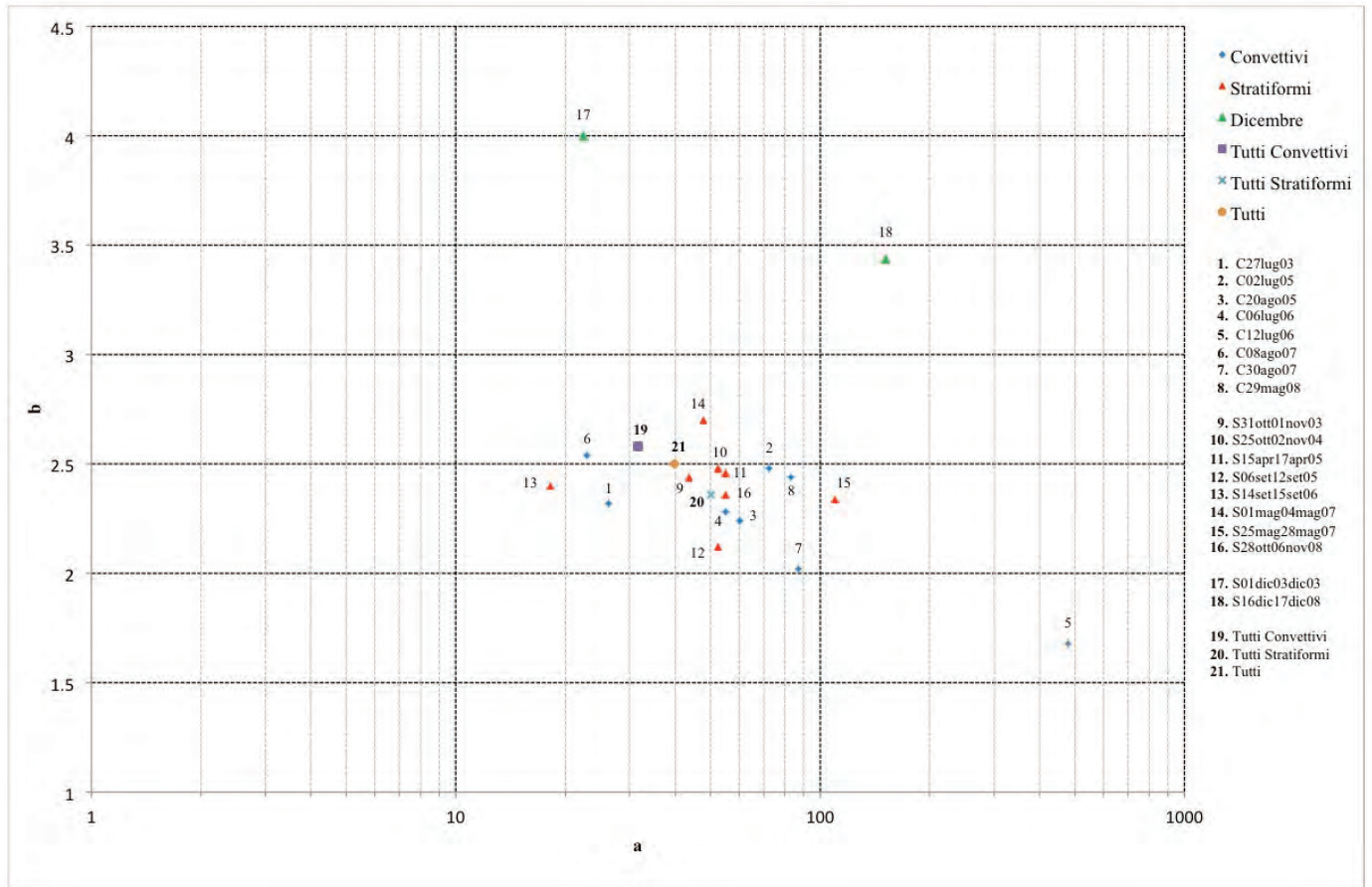


Figura 2.10: Valori ottimali dei parametri della relazione ZR stimati per gli eventi in esame.

Questo ha portato alla definizione della seguente relazione di potenza (1.1):

$$Z = 40 \cdot R^{2.5} \quad (3.6)$$

In precedenza una stima, di poco differente, dei parametri ottimali era stata ottenuta considerando tutte le 267 stazioni al di sotto della quota raggio pari a 4000 metri, scelta in precedenza come soglia per delineare l'area di accettazione. Riportando in grafico (Figura 2.11) la cumulata stimata e la cumulata osservata per stazione si può vedere come su alcune stazioni, quelle più distanti, si avesse un'importante sottostima. Si è quindi scelto di andare a considerare nella definizione della soglia di accettazione anche una distanza limite di 125 km dal radar, oltre alla quota raggio di 4000 m. Questo ha portato a ridurre a 248 il numero di stazioni in esame escludendo, come si vede in Figura 2.12, le stazioni in Emilia-Romagna e Lombardia. La stima dei valori ottimali dei parametri è stata quindi ricalcolata prendendo in esame queste 248 stazioni, arrivando a definire la relazione ZR come riportata in (3.6).

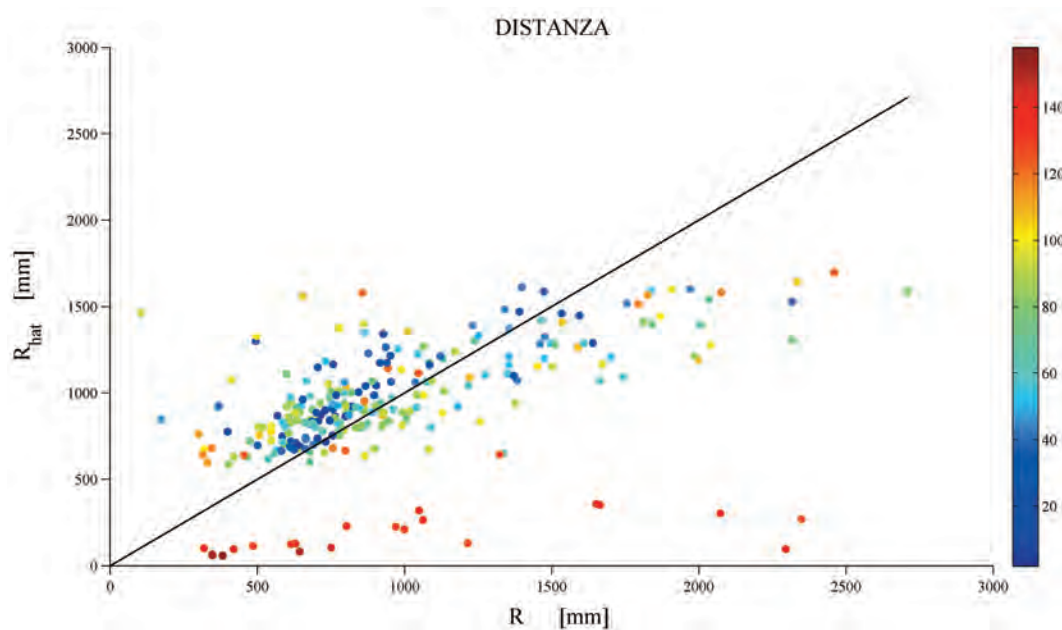


Figura 2.11: Diagramma di dispersione della Rhat stimata da radar rispetto al Ross ai pluviometri.

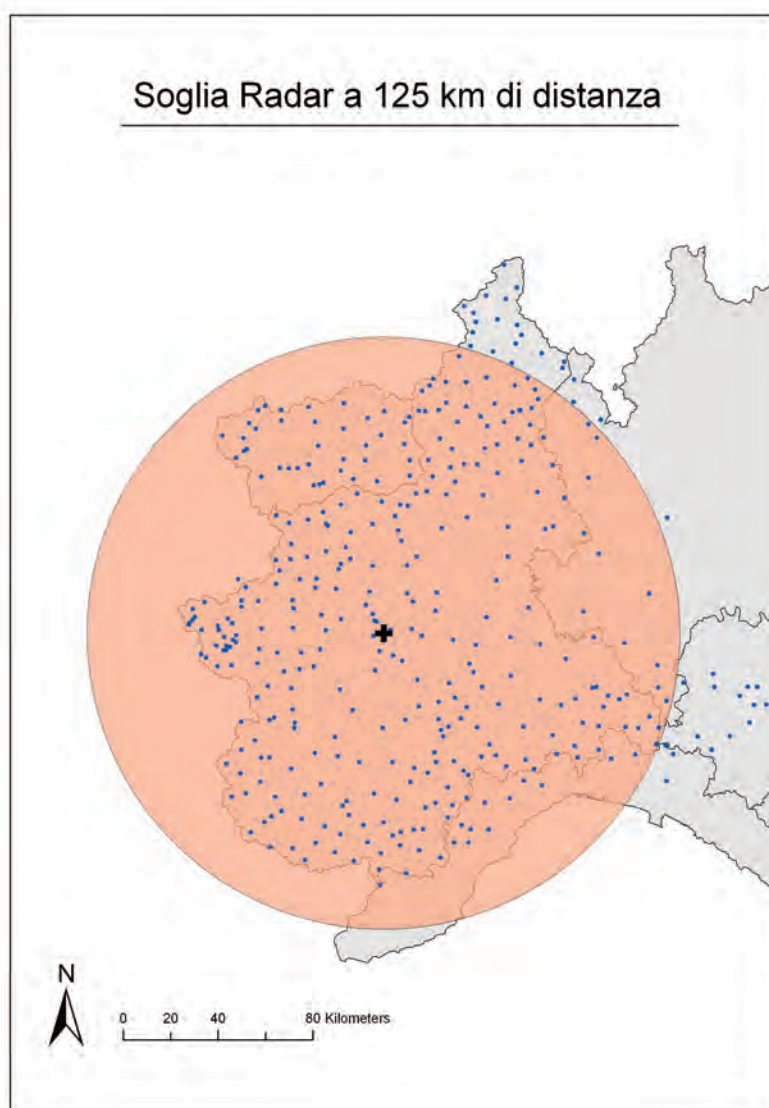


Figura 2.12: Rappresentazione delle stazioni a distanza inferiore di 125 km dal radar.

3.3 Confronto con la relazione di Joss e Waldvogel

Col fine di verificare la qualità della stima della precipitazione proposta del presente studio si è scelto di confrontare i risultati ottenuti utilizzando la relazione (3.6) con quelli che si otterrebbero utilizzando la relazione proposta da Joss e Waldvogel nel 1970:

$$Z = 300 \cdot R^{1.5} \quad (3.7)$$

In figura 2.13 è riportato un confronto, per l'evento del 20 agosto 2005, tra la precipitazione cumulata stimata attraverso la relazione 3.6 (Figura 2.13 a) e la cumulata ottenuta utilizzando la relazione di Joss e Waldvogel (Figura 2.13 b), entrambe rappresentate in funzione della precipitazione cumulata osservata.

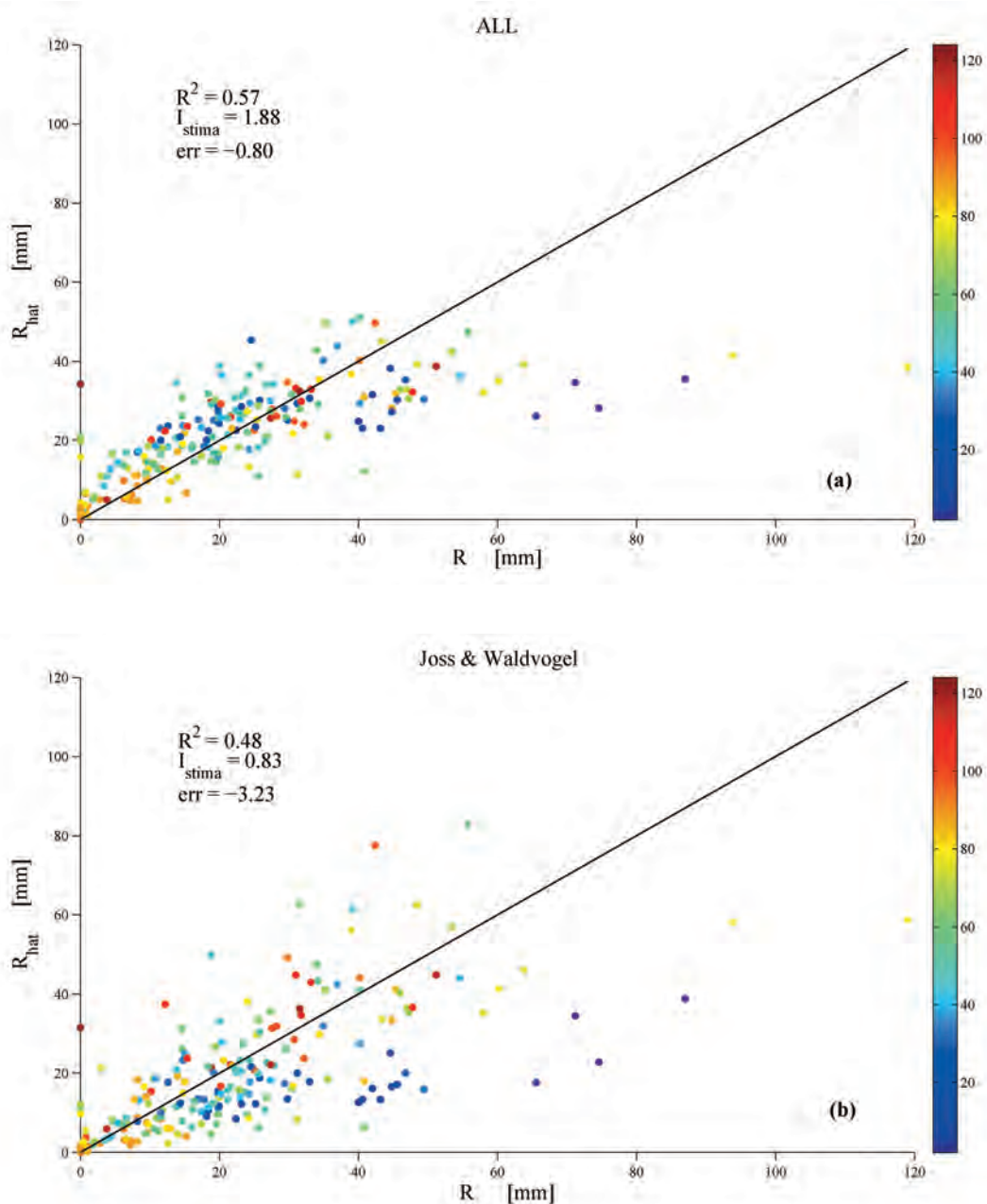


Figura 2.13: Diagramma di dispersione della Rhatstimata da radar rispetto al Ross ai pluviometri usando la relazione globale ricavata nel presente studio (a) e la relazione proposta da Joss&Waldvogel (b).

Visivamente la differenza tra le due stime sembra essere ridotta, per questo sono stati definiti tre indici in grado di evidenziarla. Oltre al coefficiente di determinazione R^2 è stato calcolato un indice I_{stima} definito come:

$$I_{stima} = \frac{m}{p} \quad (3.8)$$

Dove m è il numero di stazioni sovrastimate e p il numero di stazioni sottostimate.

Infine è stato calcolato l'errore sulla stima del volume di pioggia per ogni stazione secondo la relazione:

$$err = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^d \left(\frac{\widehat{R}_{i,j}}{6} - R_{obs\ i,j} \right) \quad (3.9)$$

Nell'esempio del 20 agosto 2005 si può vedere come mentre il coefficiente R^2 è simile per entrambe le relazioni, l'errore di stima in volume (err) è ridotto usando la relazione proposta dal presente studio, mentre Joss e Waldvogel porta a una sottostima rilevante. Nella Tabella 2.11 si riportano gli indici calcolati per tutti gli eventi (ad eccezione dei due eventi 17,18 considerati affetti da precipitazione nevosa) con entrambe le relazioni. Si può vedere come le considerazioni fatte in precedenza sulla migliore stima in volume fornita dalla relazione 3.6 valgono, in generale, per tutti gli eventi presi in considerazione.

N. Evento	Parametri Globali a=40 b=2.5			Parametri Joss&Waldvogel a=300 b=1.5		
	R^2	I_{stima}	Err	R^2	I_{stima}	Err
1	**	0.76	-7.18	**	0.68	-7.04
2	0.45	2.02	-0.82	0.44	1.11	-4.42
3	0.57	1.86	-0.8	0.48	0.83	-3.23
4	0.65	0.85	-2.81	0.67	0.37	-4.26
5	0.58	7.81	2.68	0.39	8.92	3.69
6	**	0.18	-18.91	**	0.14	-18.27
7	0.66	0.57	-0.91	0.76	0.62	-2.21
8	0.56	2.98	3.49	0.57	1.27	-2.87
9	0.42	1.38	-4.07	0.23	0.25	-21.68
10	0.55	2.14	0.58	0.02	0.12	-66.89
11	0.45	2.01	1.79	**	0.27	-21.05
12	0.51	0.51	-18.16	0.01	0.09	-43.55
13	**	0.05	-52.47	**	0.01	-85.07
14	0.13	2.15	7.61	**	0.41	-18.59
15	0.63	4.72	14.99	0.58	1.14	-2.79
16	0.32	1.27	-13.51	**	0.15	-73.38

Tabella 2.11: Confronto ricostruzione precipitazione cumulata per stazione per ogni evento.

Nella seguente tabella 2.12 si mostrano invece i risultati del calcolo degli indici definiti in precedenza nel caso in cui vengono confrontate le stime di pioggia alla scala di dettaglio, invece delle precipitazioni cumulate per stazione. In merito alla qualità della ricostruzione della precipitazione ai 10 minuti si può vedere come la relazione (3.6) fornisca sempre un indice di determinazione R^2 maggiore e un minor errore di stima in volume (err) rispetto alla relazione di Joss e Waldvogel. Questo risultato conferma la scelta di ricercare una relazione generale di trasformazione della riflettività radar in intensità di precipitazione che sia in grado di ricostruire non solo la precipitazione cumulata ma anche la precipitazione istantanea alla scala di dettaglio del radar.

N. Evento	Parametri Globali a=40 b=2.5			Parametri Joss&Waldvogel a=300 b=1.5		
	R^2	I_{stima}	Err	R^2	I_{stima}	Err
1	0.15	4.60	-0.50	**	2.40	-0.76
2	0.13	3.00	0.15	**	1.75	-0.25
3	0.24	2.65	-0.08	**	1.16	-0.54
4	0.23	3.28	0.19	0.06	1.49	-0.60
5	0.34	13.05	0.66	**	4.52	1.64
6	0.21	3.41	-0.65	**	1.78	-0.74
7	0.35	4.20	0.01	0.11	1.53	-0.37
8	0.19	2.00	0.01	**	1.08	-0.66
9	0.32	1.71	-0.15	0.12	0.75	-1.18
10	0.22	1.93	-0.03	0.05	0.81	-0.97
11	0.34	2.44	0.10	0.12	0.98	-0.91
12	0.34	2.02	-0.35	0.24	0.81	-1.33
13	0.23	0.63	-1.62	**	0.23	-2.86
14	0.28	2.43	0.19	**	1.09	-0.61
15	0.20	4.26	0.46	**	1.85	-0.03
16	0.30	1.69	-0.02	0.08	0.81	-0.98

Tabella 2.12: Confronto ricostruzione precipitazione ai 10 minuti per ogni evento.

4. STIMA DELL'INCERTEZZA ASSOCIATA ALLE PRECIPITAZIONI RICOSTRUITE DA RADAR

Dopo aver stimato la coppia di parametri a e b che definisce la relazione Z-R (3.5) si procede alla stima dell'incertezza sulle 248 stazioni prese in considerazione. L'analisi è stata svolta analizzando, su ogni singola stazione, tutti gli eventi insieme. Il confronto è stato portato avanti a diverse scale di dettaglio, considerando sia le singole registrazioni ai 10 minuti sia i dati aggregati tramite media mobile per alcune durate caratteristiche (1h, 3h, 6h, 12h, 24h). A titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti per una durata di 1h.

4.1 Procedura di calcolo

Step1

Considerando ogni stazione singolarmente, si sono aggregati in intervalli della durata di 1h i dati di precipitazione osservata e di precipitazione stimata da radar. I valori aggregati della precipitazione stimata sono stati raccolti, utilizzando la tecnica del "data binning", in classi con ampiezza minima che diminuisce all'aumentare della durata della finestra di aggregazione (per 1h l'ampiezza è pari a 0.5 mm/h). L'ampiezza minima viene incrementata, aggregando classi contigue, quando la classe non contiene almeno 10 osservazioni. E' stata inoltre definita una classe, a cui viene assegnato il valore 0, in cui ricadono tutti i valori stimati compresi tra 0 e 0.2 mm/h (valore pari alla soglia di sensibilità del pluviometro). Per le altre classi viene scelto come valore rappresentativo quello centrale dell'intervallo, R_k .

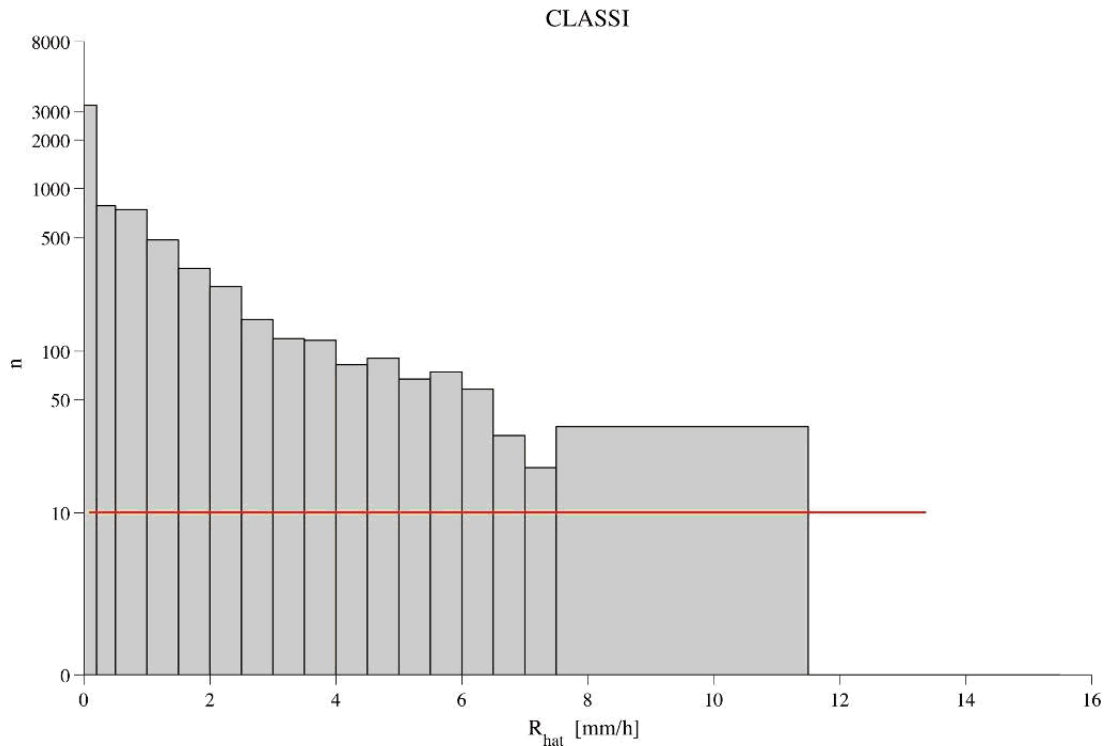


Figura 2.14: Classi di ampiezza variabile per la precipitazione stimata alla stazione di Cumiana. In ordinata si riporta il numero di elementi ricadenti in ogni classe.

Step2

L'incertezza associata alle stime ricadenti in ogni classe di precipitazione è stata calcolata confrontando i valori di precipitazione stimata ed osservata, secondo la relazione, che definisce la deviazione standard di un campione:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{n_k} \cdot \sum_{j=1}^{n_k} (\hat{R}_j - R_{obs_j})^2} \quad (4.1)$$

dove n_k è il numero di elementi nella k -esima classe.

L'andamento della deviazione standard in funzione del valore di precipitazione stimata può essere descritto attraverso la relazione lineare

$$\sigma = \beta + \alpha \cdot \hat{R} \quad (4.2)$$

dove α è il coefficiente angolare, che viene stimato per mezzo di una regressione lineare dei valori di σ_k verso i corrispondenti valori R_k , mentre l'intercetta β corrisponde al valore σ_1 , ossia alla deviazione standard della prima classe, a cui corrisponde un valore nullo di precipitazione. La Figura 2.15 mostra, a titolo di esempio, la retta di regressione calcolata per la stazione di Cumiana.

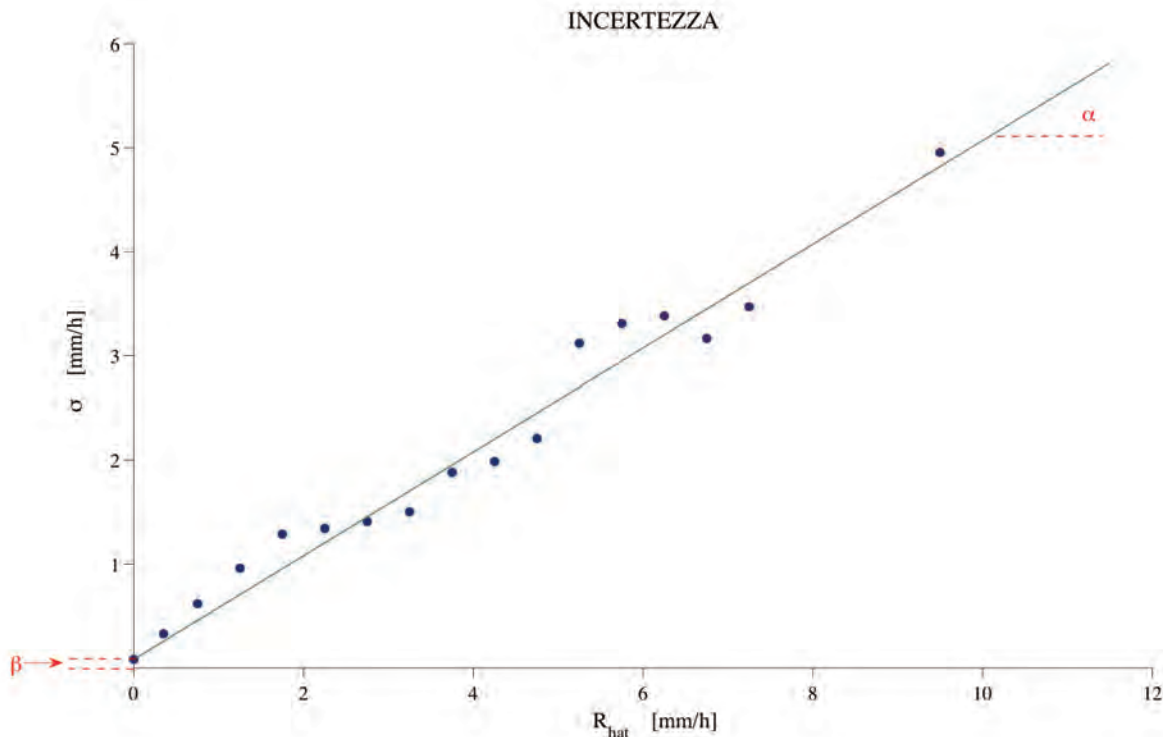


Fig. 2.15: Rappresentazione della deviazione standard per ogni classe di precipitazione e relativa retta di regressione

4.2 Analisi dei Risultati

I coefficienti α e β calcolati per ogni stazione, seguendo la procedura descritta nel paragrafo 4.1, sono stati messi in relazione con alcuni descrittori (quota raggio e distanza). Dei due coefficienti che descrivono l'incertezza β appare significativamente correlato sia con la quota raggio sia, in misura minore, con la distanza, che tuttavia non risultano contemporaneamente significativi in un modello di regressione multipla. Data la maggiore significatività si è scelto di descrivere il coefficiente β in funzione della sola quota raggio secondo la relazione

$$\beta = 0,007 + 0,00013 * \text{quota}_{RA} \left[\frac{mm}{h} \right] \quad (4.3)$$

Il coefficiente angolare α risulta invece debolmente correlato sia con la quota raggio sia con la distanza. Si è quindi scelto di attribuirgli un valore costante pari a quello medio. In base alla relazione (4.3) è quindi possibile definire una relazione lineare che per ogni valore di precipitazione stimata, aggregata all'ora in questo particolare esempio, restituisca il valore della deviazione standard dello stimatore in funzione della sola quota raggio del sito preso in esame:

$$\sigma_{1h} = 0,007 + 0,00013 * \text{quota}_{RA} + 0,6875 \cdot \hat{R} \quad (4.4)$$

4.3 Esempio di Applicazione

A titolo di esempio si riportano in Figura 2.16 il campo delle piogge stimate tramite radar, con le relative deviazioni standard, relative al 14 Settembre 2006, ore 23:00-23:50.

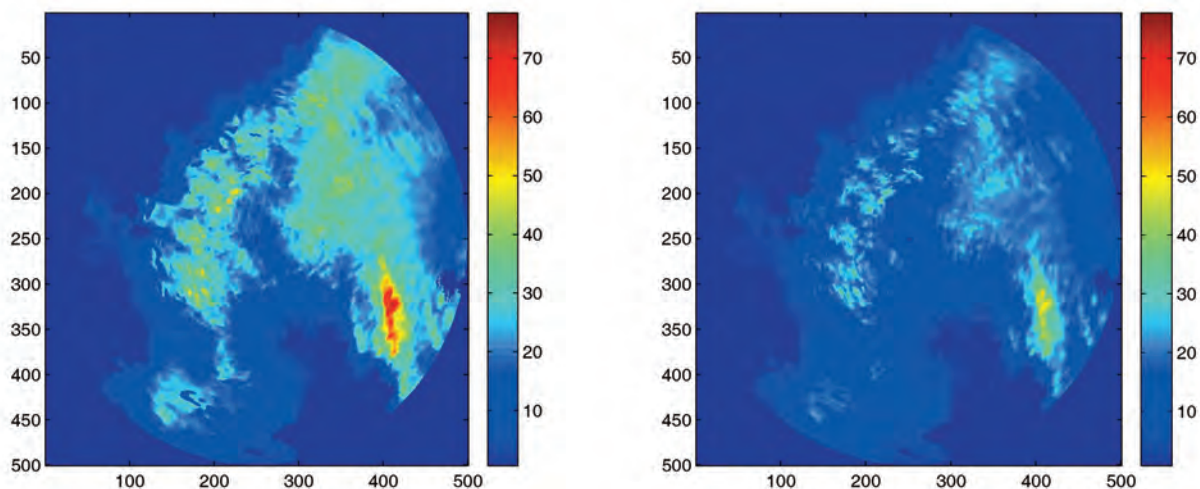


Figura 2.16: Precipitazioni stimate tramite radar (grafico a sinistra) e corrispondente deviazione standard (grafico a destra) in data 14 Settembre 2006, ore 23:00-23:50.

5. APPLICAZIONI NEL CONTESTO OPERATIVO

Le attività svolte nell'ambito del progetto e le ricerche finalizzate ad un utilizzo delle stime di precipitazione da sistemi radar meteorologici, portano ad alcune riflessioni sull'utilizzo operativo di tali stime nella modellistica idrologica. Il principale valore aggiunto di questi sistemi osservativi nell'operatività dei Centri Funzionali è quello di poter contare su una stima del campo di precipitazione in tempi estremamente contenuti rispetto a quelli caratteristici delle classiche reti meteorologiche a terra. Come ha dimostrato il confronto sistematico con i pluviometri, le incertezze che caratterizzano la stima radar del campo di precipitazione in ambienti dall'orografia complessa o dalla scarsa visibilità come i piccoli bacini montani, dove le piene improvvise si manifestano con maggiore frequenza, sono ad oggi ancora difficilmente quantificabili. Infine le incertezze che caratterizzano intrinsecamente la modellistica idrologica nell'applicazione a bacini spesso non strumentati o con serie storiche non utilizzabili per la calibrazione dei modelli, porta a considerare le simulazioni numeriche deterministiche come uno strumento insufficiente per un'affidabile attività operativa.

Caratterizzata in modo rigoroso e sistematico l'incertezza delle stime di precipitazione in ambiente orografico complesso, la loro integrazione con i sistemi di previsione delle piene appare delinearsi attraverso sistemi operativi semplificati (quali ad esempio quelle richieste in un approccio di tipo 'ensemble' o simulazione 'Monte Carlo'), che possano giovare della tempestività delle osservazioni da radar, ma che nel contempo gestiscano le incertezze presenti nella catena modellistica senza appesantire il processo con elaborazioni onerose.

La metodologia proposta da Mancini et al. (2002), basata su soglie pluviometriche d'allertamento ricavate da simulazioni idrologiche fuori linea, consente di costruire un processo di immediato utilizzo che ben si presta ad essere ampliato per consentire una gestione esplicita dell'incertezza essendo caratterizzato da poche variabili e tempi di calcolo trascurabili (Figura 2.17).

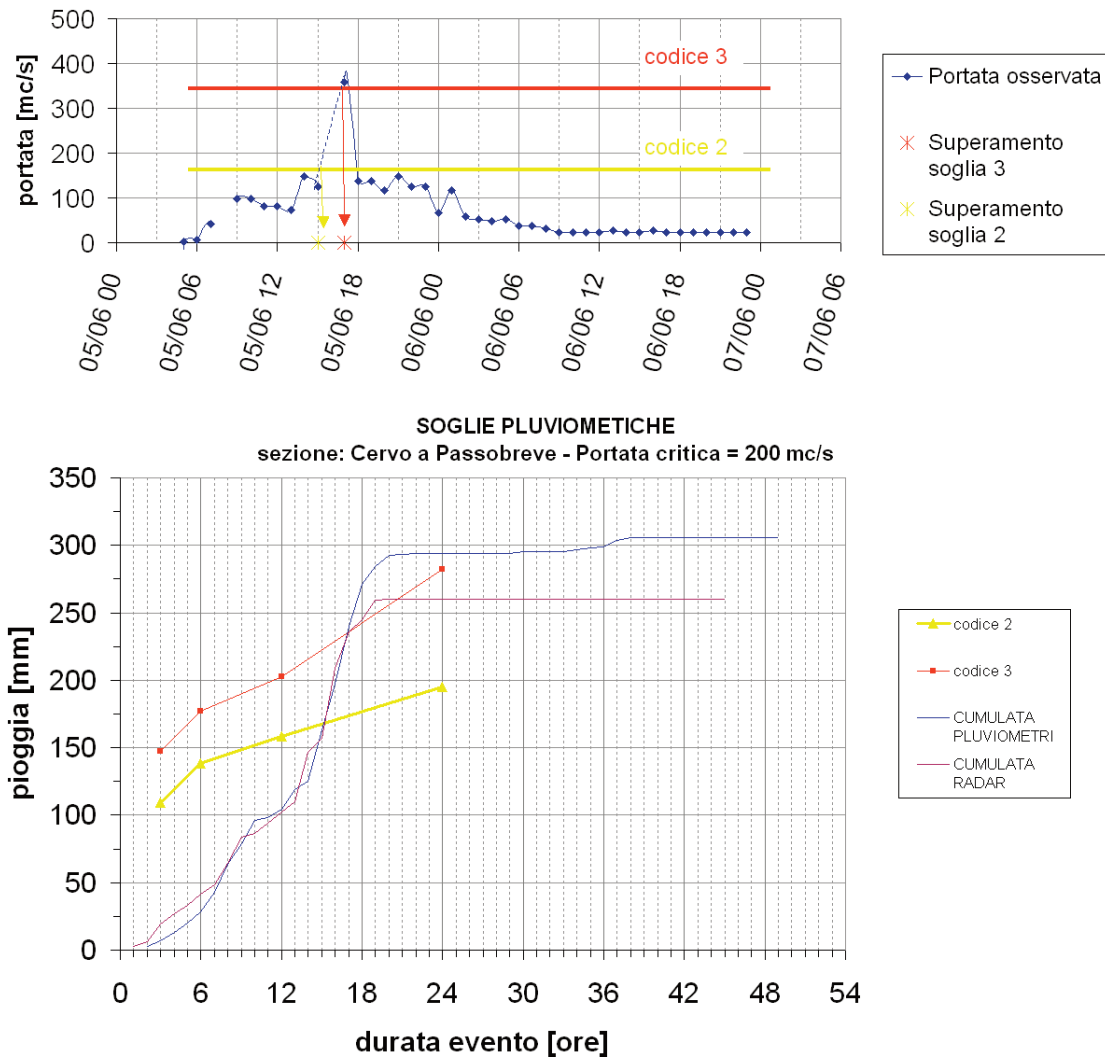


Figura 2.17: Applicazione delle soglie pluviometriche. Sopra si riporta l'idrogramma osservato con l'indicazione delle soglie idrometriche. Sotto si riporta l'andamento della pioggia cumulata ragguagliata. Si nota il superamento sia delle soglie pluviometriche di codice 2 e 3 con circa 30' di anticipo rispetto alle corrispondenti condizioni in alveo.

La metodologia descritta si presta ad un utilizzo affidabile nel contesto operativo limitatamente a quei bacini dove le incertezze sono contenute, consentendo una valorizzazione del dato radarmeteorologico nelle applicazioni di nowcasting idrologico. Nell'ambito del sistema di monitoraggio e nowcasting dei temporali, attraverso la loro identificazione e il loro tracking, (TREC - Tracking Radar Echoes by Correlation), la cella viene identificata ed inseguita durante la sua evoluzione (Tiranti et al. 2011). In un ambiente georiferito si individuano i bacini critici interessati dal temporale, valutando il solido di precipitazione sul bacino dalla stima del radar meteorologico (Davini et al, 2012). La figura seguente 2.18 mostra un esempio di superamento per un bacino in Val Cenischia (TO) avvenuto il 3 settembre 2011 (Marco et al. 2012).

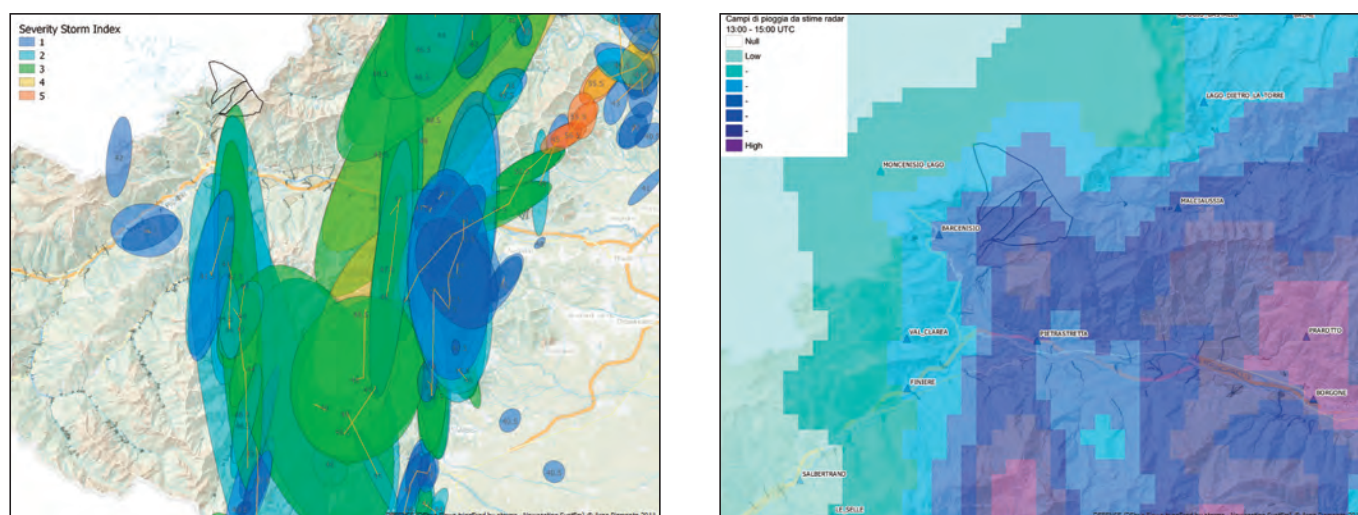


Figura 2.18: 3 settembre 2011. A sinistra localizzazione delle celle (ellissi), del percorso (linee rosse) dei temporali: i valori indicano la massima riflettività. In giallo il bacino nel quale si è registrato un superamento. A destra: precipitazione cumulata tra le 13:00 e le 15:00 UTC del 3 settembre 2012

Le attività di caratterizzazione dell'incertezza nelle stime di precipitazione da radar meteorologico costituiscono il primo irrinunciabile passo per l'utilizzo in ambiente alpino di tali stime in ambito idrologico e di effetti al suolo. Il progetto ha quindi consentito l'individuazione di quei bacini idrologici, dove le incertezze, intrinsecamente connesse a misure in "remote sensing", sono contenute, rendendo applicabili algoritmi di nowcasting idrologico.

CONCLUSIONI

Nell'ambito del presente lavoro si è innanzitutto organizzata un'ampia base dati relativa a misure di riflettività e di precipitazione a terra per un elevato numero di eventi convettivi e stratiformi, riferiti ad una estesa area ad orografia complessa situata in Italia Nord Occidentale (Regione Piemonte). I dati raccolti hanno consentito di ottenere stimatori aggiornati dei parametri a e b della relazione $Z-R$, validi nella regione in esame. Non si sono riscontrate differenze significative negli stimatori di tali parametri per eventi convettivi e stratiformi, consentendo di pervenire ad un'unica relazione, di forma $Z=40 R^{2.5}$. I coefficienti determinati sono piuttosto diversi da quelli utilizzati in applicazioni standard: in particolare, il coefficiente a risulta notevolmente più basso dei valori classici (150-300), mentre il coefficiente b assume valori piuttosto elevati (i valori tipici di letteratura sono intorno a 1.5). Si è dimostrato che le differenze sono in realtà meno significative di quanto sembrerebbe, in ragione del fatto che i valori ottimali dei coefficienti si dispongono lungo una diagonale sul piano $\{\log(a), b\}$. Inoltre, ci si è concentrati nella presente applicazione su eventi di precipitazione particolarmente intensi, mentre molte delle relazioni $Z-R$ classiche sono state tarate in condizioni meno estreme e considerando aggregazioni temporali anche piuttosto ampie (dati giornalieri o stagionali).

A conclusione del lavoro svolto, si è determinata una relazione che consente di stimare la deviazione standard delle precipitazioni ottenute da radar meteorologico. Tale relazione mostra che l'incertezza associata alle stime radar è fortemente dipendente dal valore stesso dello stimatore di pioggia, ed è debolmente dipendente da altri fattori, quali ad esempio la quota assoluta minima del fascio emesso dal radar. Le stime di precipitazione da radar ottenute nel presente lavoro, oltre ad essere più accurate di quelle usate in passato, saranno dunque associabili ad un livello di incertezza, elemento fondamentale per consentire un uso più proficuo del dato da radar meteorologico in applicazioni idrologiche relative ad eventi di forte intensità.

BIBLIOGRAFIA

- Alfieri L., Claps P. and Laio F., Time-dependent Z-R relationships for estimating rainfall fields from radar measurements, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 149–158, 2010.
- Ciach, G. J. and Krajewski, W. F.: Radar-rain gauge comparisons under observational uncertainties, *J. Appl. Meteorol.*, 38, 1519– 1525, 1999.
- Davini, P.; Bechini, R.; Cremonini, R.; Cassardo, C. Radar-Based Analysis of Convective Storms over Northwestern Italy. *Atmosphere* 2012, 3, 33-58.
- Joss, J. and Waldvogel, A.: A method to improve the accuracy of radar-measured amounts of precipitation, in: *Preprints, 14th Radar Meteorology Conf.*, Tucson, AZ, 237–238, 1970.
- M. Mancini, P. Mazzetti, S. Nativi, D. Rabuffetti, G. Ravazzani, P. Amadio, R. Rosso, Definizione di soglie pluviometriche di piena per la realizzazione di un sistema di allertamento in tempo reale per il bacino dell'Arno a monte di Firenze, *Atti del 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Potenza, Italia, 2002.
- F Marco, D Tiranti, R Cremonini, S Barbero (2012) Attività torrentizia in Val Cenischia - Inquadramento delle recenti riattivazioni rispetto alla classificazione regionale dei conoidi alluvionali, *Arpa Piemonte Collana informativa tecnico-scientifica Quaderno geologico n° 21*, pp 22.
- Marshall, J. M. and Palmer W. M. K.: The distribution of raindrops with size, *J. Appl. Meteorol.*, 5, 165–166, 1948.
- D. Tiranti, D. Cremonini, R. Pispico (2011) Predicting debris flows occurrence through the radar stormtracking method. In: *Geoitalia 2011 - VIII Forum Italiano di Scienze della Terra - Torino, Italia, 19-23 settembre 2011*.
- Woodley, W. L., Olsen, A. R., Herndon, A., and Wiggert, V.: Comparison of gauge and radar methods of convective rain measurement, *J. Appl. Meteorol.*, 14, 909–928, 1975.

3

Previsione delle piene improvvise nei piccoli bacini



OBIETTIVI

Gli obiettivi scientifici di questa azione intendono contribuire allo sviluppo degli aspetti di ricerca legati a previsioni di piena operativa su piccoli e medi bacini in ambiente alpino.

Eventi naturali quali piene di fiumi, colate detritiche, frane ed esondazioni di laghi causano ogni anno in Svizzera danni per centinaia di milioni di franchi. Le stime attuali indicano che dal 1972 gli eventi naturali legati al maltempo hanno provocato danni per oltre 13.5 miliardi di franchi (Hilker et al., 2008). Negli ultimi decenni il Canton Ticino è stato colpito più volte da eventi di questo tipo, causando ingenti danni materiali nel 1978, 1987, 1993 e nel 2000 (cfr. Figura 3.1).

Per contenere i danni si è ricorsi ad interventi diretti sul territorio costruendo opere di protezione e definendo le zone esposte a pericolo. Queste misure stabili di protezione attiva sono spesso insufficienti nel caso l'evento di dimensionamento venga superato e devono pertanto essere integrate con misure di protezione di carattere gestionale mirate, quando eventi estremi colpiscono in modo particolarmente intenso una determinata regione. Per riconoscere in anticipo tali eventi e coordinare gli interventi durante situazioni di emergenza sono necessarie previsioni meteorologiche ed idrologiche operazionali attendibili, con un anticipo di diverse ore o, meglio, di uno o più giorni.

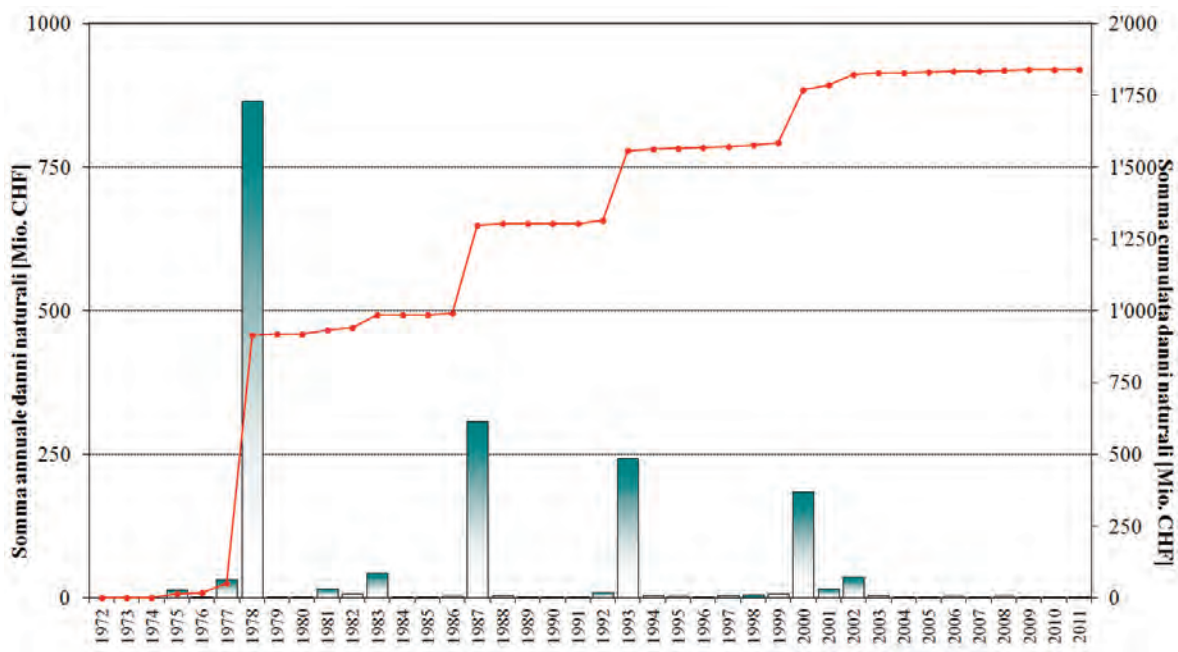


Figura 3.1: Stima del costo dei danni dovuti ad alluvioni, colate detritiche ed esondazioni in Ticino dal 1972 al 2011 (Hilker et al., 2008).

I progressi della ricerca in ambito meteorologico ed idrologico negli ultimi anni hanno permesso lo sviluppo di nuovi sistemi previsionali che si servono di una nuova generazione di modelli numerici per la previsione del tempo e che si avvalgono di modelli idrologici deterministici distribuiti (Zappa & Vogt, 2007). Dal giugno del 2007 una realizzazione operativa di questi modelli è adottata e valutata nell'ambito del progetto MAP D-PHASE (Zappa et al., 2008).

Nel campo delle previsioni di piena le sfide più ambiziose sono quelle che riguardano le piene torrentizie in bacini di piccole dimensioni con tempi di reazione molto corti. Queste piene sono una delle maggiori cause di danni, sia per l'ambiente e per le infrastrutture, come anche per la popolazione che vive nelle regioni a rischio (Borga et al., 2011; Chiang et al., 2007; Hapuarachchi et al., 2011). Lo spazio montano tipico delle regioni al sud delle Alpi è particolarmente esposto a tali rischi, in quanto la topografia favorisce lo sviluppo di eventi di precipitazione di carattere convettivo con intensità molto elevate (Panziera and Germann, 2010).

L'ambiente montano è caratterizzato da suoli poco profondi che raggiungono rapidamente la soglia di saturazione, favorendo una reazione immediata del bacino sotto forma di piene repentine (Liechti et al., 2012a). Questi bacini sono, come detto, generalmente di dimensioni limitate e sprovvisti o poco equipaggiati con stazioni per misurare i dati meteorologici necessari per definire modelli di previsione accurati.

La stima di dati quantitativi di precipitazione per piccoli bacini nella regione alpina è una sfida a cui la comunità scientifica in campo meteorologico si sta dedicando da decenni (Germann et al., 2006; Hapuarachchi et al., 2011; Werner and Cranston, 2009) e anche in ambito idrologico l'analisi e la previsione di piene torrentizie sono uno dei temi più caldi della ricerca (Chiang et al., 2007; Collier, 2007). Solo in tempi recenti dati di radar meteorologici hanno cominciato a essere integrati quale alternativa alle reti pluviometriche tradizionali nell'ambito della previsione delle piene (Schiemann et al., 2011), fornendo nuovo impulso al tentativo di migliorare la qualità delle previsioni idrologiche in regioni remote e non coperte dalla rete pluviometrica (Chiang et al., 2007; Hapuarachchi et al., 2011).

Il vantaggio del radar meteorologico è rappresentato dall'ottima copertura sia su scala spaziale che temporale. Le stime quantitative di precipitazione (QPE) sono tuttavia soggette a molti elementi che generano incertezza. Tali incertezze sono però progressivamente state ridotte nell'arco degli ultimi 15 anni (Germann et al., 2006; Kraiewsky et al., 2010).

La comunità idrologica ha sempre sottolineato la criticità dovuta alla mancanza di stime di incertezza dell'informazione proveniente dal radar meteorologico ed ha quindi spesso rinunciato a farne uso per scopi operazionali (Rossa et al., 2005; Rossa et al., 2011). Solo recentemente numerosi studi sono stati sviluppati per far fronte a questo problema (Berenguer et al., 2005; Krajewsky and Smith, 2002; Szturc et al., 2008; Villarini et al., 2010; Zappa et al., 2010).

A questo riguardo Meteo Svizzera ha svolto un lavoro pionieristico fornendo il primo studio al riguardo con radar e modello idrologico accoppiato (Germann et al., 2009; Liechti et al., 2012b). L'uso della tecnologia del Radar Ensemble REAL accoppiata al modello idrologico PREVAH (Viviroli et al., 2009) ha prodotto una serie unica di 4 anni (2007-2010¹) di dati semi-operazionali, per valutare la qualità di tali prodotti nella regione del Nord del Ticino durante lo sviluppo del progetto FLORA.

I dati del radar hanno una ridotta capacità previsionale, limitata esclusivamente all'inerzia del sistema una volta che il dato è stato introdotto nel modello. Per estendere la capacità previsionale le serie di precipitazione devono essere prolungate con dati di modelli atmosferici per la previsione del tempo (NWP; Zappa et al., 2011; Cloke and Pappenberger, 2009) o con estrapolazioni del segnale radar (Panziera et al., 2012; Mandapaka et al., 2012). Alcuni di questi aspetti sono stati realizzati in maniera sperimentale nel corso del progetto FLORA e vengono presentati nei capitoli successivi.

¹ Nel 2011 i dati del radar di Meteo Svizzera sul Monte Lema non sono disponibili in maniera continua ed omogenea, in quanto nel maggio del 2011 l'impianto del radar è stato sostituito da un modello di nuova generazione che è ancora in fase di calibrazione.

ATTIVITÀ

Le attività descritte in dettaglio nei paragrafi seguenti, possono essere riassunte in questo modo:

- Applicazione a tutta la regione del Sopraceneri del Cantone Ticino della tecnologia Radar Ensemble (input di precipitazione probabilistico) accoppiata alla simulazione idrologica dei rispettivi bacini idrografici tramite il modello idrologico PREVAH e valutazione statistica dei risultati, in termini di performance rispetto alle previsioni deterministiche.
- Simulazione idrologica deterministica per la regione del Sottoceneri del Cantone Ticino, per la quale non si dispone del prodotto Radar Ensemble, effettuata tramite l'accoppiamento delle misure del radar meteorologico e delle misure a terra con le previsioni meteorologiche deterministiche dei modelli COSMOCH7 e COSMOCH2 operativi presso MeteoSvizzera.
- Analisi scientifica delle simulazioni per il periodo 2007-2010.
- Creazione di una catena di previsione e nowcasting operativa, tramite la realizzazione di un sito web protetto e dedicato alla visualizzazione dei prodotti realizzati e sopra ricordati.

1. SIMULAZIONI ENSEMBLE SOPRACENERI

1.1 Estensione a tutta la regione del Sopraceneri

Alla fine del 2009 l'applicazione idrologica della tecnologia "Radar Ensemble" REAL (Germann et al., 2009) è stata estesa a tutto il dominio della regione del Sopraceneri per la quale il prodotto REAL viene calcolato da MeteoSvizzera (Figura 3.2, sinistra).

REAL consiste in 25 varianti per la stima di precipitazione da parte del radar meteorologico. Queste 25 varianti costituiscono 25 serie indipendenti di "misure" di precipitazione che possono essere utilizzate per lanciare un modello idrologico distribuito come PREVAH (Viviroli et al., 2009). Oltre ai dati REAL anche dati ottenuti da una stima deterministica da parte del radar meteorologico e da stime di precipitazioni interpolate partendo da dati osservati dai pluviometri della rete cantonale (Ufficio dei corsi d'acqua - UCA) e di MeteoSvizzera sono stati usati per lanciare il modello idrologico.

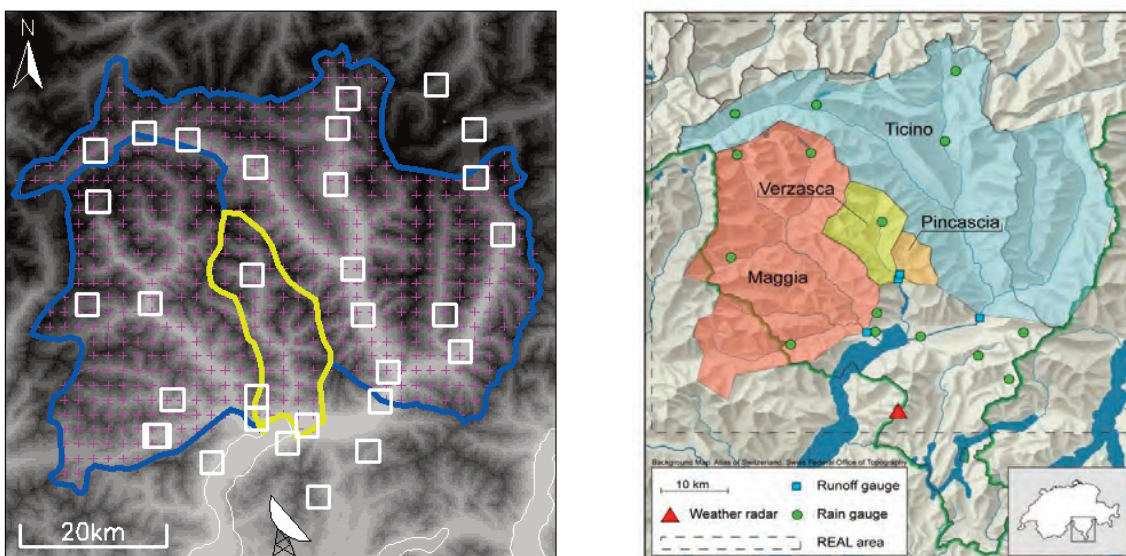


Figura 3.2: Sinistra: Dominio per il quale il "Radar Ensemble" REAL viene calcolato ogni ora e messo a disposizione per simulazioni idrologiche ensemble per il Sopraceneri. Destra: bacini principali usati per la verifica probabilistica (Liechti et al., 2012a).

Nell'ambito del progetto FLORA sono state (ri-)calcolate le simulazioni delle 25 varianti di REAL per 9 bacini della regione del Sopraceneri (inclusa la Valle Mesocco, vedi Figura 3.2, destra). Il periodo ricalcolato si estende dal 1 Aprile 2007 al 31 Dicembre 2010. Le simulazioni sono state lanciate ogni giorno, per la durata di 10 giorni. Durante la verifica delle serie a disposizione si è constatato che sarebbe stato molto interessante individuare il numero di giorni "ideale" per sfruttare al meglio lo "spread" generato dal "radar ensemble". Le simulazioni con REAL hanno permesso di allestire 10 catene continue di deflussi simulati per 25 membri su scala oraria (cfr. Figura 3.3). Ognuna delle 10 catene considera un diverso periodo temporale lasciato a "REAL" per differire dalle simulazioni ottenute usando il segnale deterministico del radar e i dati ottenuti dai pluviometri di MeteoSvizzera e della rete cantonale.

Si può parlare di crescita dello spread dovuto alla propagazione dell'incertezza di REAL attraverso il modello idrologico. Lo "spread" ideale consente di ottenere simulazioni e previsioni di qualità superiore.

Una serie completa di dati è stata quindi allestita per i seguenti bacini: Riale di Pincascia (Valle Verzasca), Verzasca, Maggia a Bignasco, Maggia a Locarno-Solduno, Brenno a Loderio, Calancasca a Buseno, Moesa a Lumino, Ticino a Pollegio e Ticino a Bellinzona.

Le analisi statistiche dei dati riguardanti il fiume Verzasca sono state elaborate nell'ambito del progetto finanziato dall'unione Europea IMPRINTS e presentate ad un Workshop a Barcellona nel giugno del 2010. Le verifiche per gli altri bacini interessati dal progetto FLORA (ma non da IMPRINTS) sono state calcolate in seguito.

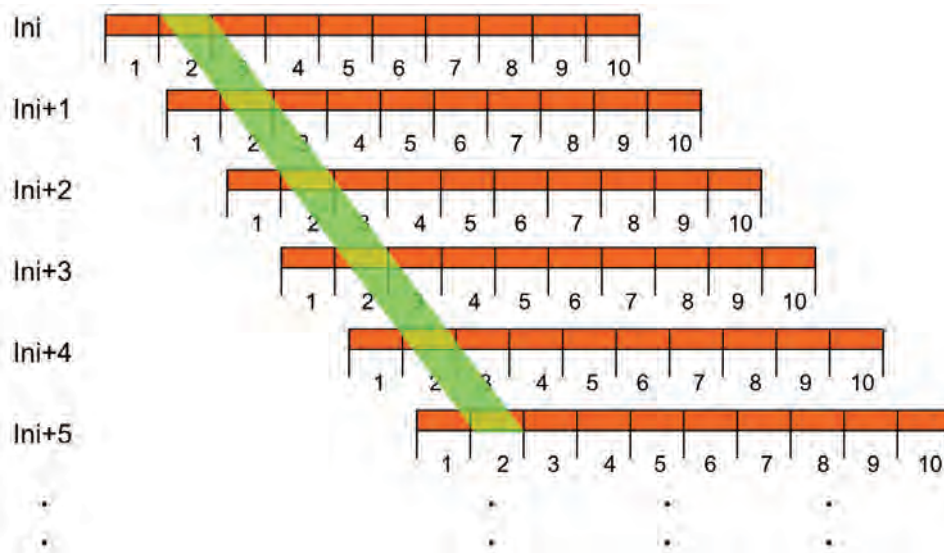


Figura 3.3: Procedura per generare una catena continua di simulazioni "ensemble", a partire da serie ricalcolate lanciate ogni giorno e lunghe 10 giorni. Possono essere create 10 catene diverse, ognuna di esse ha un numero di giorni crescente in cui l'ensemble" ha potuto "svilupparsi" e propagarsi una volta usato come input per il modello idrologico.

La Figura 3.4 mostra le serie di dati per i bacini Maggia (Locarno-Solduno) e Ticino (Bellinzona) per il periodo 2007-2009.

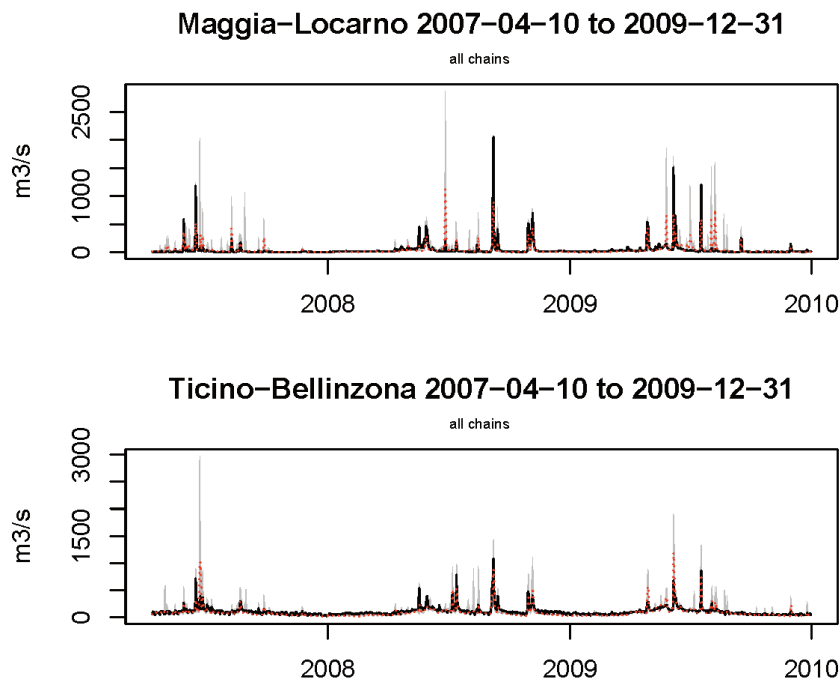


Figura 3.4: Serie complete di simulazioni ricalcolate con il metodo REAL-PREVAH (Germann et al., 2009) per i bacini del Ticino e della Maggia. Linea nera: misurazioni UFAM. Linea Rossa: Mediana "REAL-PREVAH". Area grigia: Spread di "REAL-PREVAH".

1.2 Verifica dati ensemble

Approccio statistico per dati probabilistici

L'analisi dei dati ensemble si avvale di metodi di verifica adatti a serie probabilistiche. In letteratura sono disponibili numerosi coefficienti definiti e utilizzati a tali fini (Wilks, 2006; Addor et al., 2011). Uno dei più popolari tra di essi è il Brier skill score (BSS). Si tratta di un coefficiente che indica la qualità di previsioni binarie (cioè la capacità di prevedere il superamento di una predefinita soglia) e permette di confrontare previsioni deterministiche e probabilistiche (Liechti et al., 2012b; Wilks, 2006). Il BSS viene derivato dal Brier Score (BS), che in sostanza coincide con l'errore quadratico medio della probabilità y_d $[0,1]$ di prevedere un evento binario o_d $\{0,1\}$, paragonato ad una previsione di riferimento (nel caso presente la climatologia della probabilità di eccedere una certa soglia di deflusso).

L'analisi si è concentrata sul periodo compreso tra i mesi di maggio e novembre, escludendo i periodi invernali dove la qualità dei dati radar è limitata e quindi anche la ricostruzione del processo di scioglimento delle nevi in primavera si dimostra problematica se i dati radar vengono utilizzati per simulare l'accumulo di neve. Nel caso del BSS, in caso di previsione "perfetta" il coefficiente assume valore 1, vale 0 se la previsione ha lo stesso contenuto informativo della previsione climatologica.

$$BS = \frac{1}{n} \cdot \sum_{d=1}^n (y_d - o_d)^2 \quad (1)$$

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{Cl}} \quad (2)$$

Sono disponibili inoltre altri metodi per verificare eventi binari, come ad esempio le tavole di contingenza (e.g. Zappa, 2008). Gli indici *False Alarm Ratio* (FAR) e *Probability Of Detection* (POD) sono misure indicate per stimare previsioni deterministiche. Per poter calcolare queste grandezze per le serie di previsioni ottenute con REAL, per le simulazioni ensemble è stata considerata la loro mediana.

L'indice FAR rappresenta la porzione di eventi presenti nelle previsioni che non sono confermati da misurazioni post-evento. FAR assume valori fra 0 e 1, con valore ideale pari a 0.

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (3)$$

dove a rappresenta il numero degli eventi previsti correttamente e b il numero di eventi previsti ma non verificatisi.

L'indice POD rappresenta la proporzione di eventi al di sopra di una soglia previsti correttamente, rispetto al numero totale di eventi effettivamente registrati.

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (4)$$

in cui a è il numero degli eventi previsti correttamente e c il numero di eventi verificatisi nella realtà ma non previsti dal modello.

Anche POD può assumere valori fra 0 e 1. Il valore ideale è 1 e corrisponde ad un numero nullo di eventi oltre la soglia non riconosciuti da parte della previsione. POD e FAR devono sempre essere calcolati contemporaneamente per ottenere una visione complessiva della qualità delle previsioni (Liechti et al., 2012b).

Infine, dati ensemble possono essere rappresentati con diagrammi ad istogramma (detti di Talagrand o "rank histograms", RH). RH indicano con quale frequenza le previsioni inglobano l'evento osservato e se il raggio delle previsioni è troppo "ottimista" ("over confident", le osservazioni sono sempre nel centro dell'ensemble) o troppo limitato ("under confident", le osservazioni cadono molto spesso al di fuori del raggio dell'ensemble).

I valori di BSS, FAR, POD ed i grafici RH possono essere calcolati per diverse soglie, spesso determinate dalla statistica delle serie osservate. Generalmente si scelgono percentili diversi per stimare la qualità per eventi medi ed eventi estremi.

Analisi di serie temporali deterministiche

Il criterio di "Nash Sutcliffe" (NASH; Nash and Sutcliffe, 1970) è generalmente usato per quantificare la qualità delle simulazioni di deflussi ottenute applicando modelli idrologici. NASH quantifica in che misura una simulazione è in grado di migliorare una previsione di riferimento, che generalmente consiste nella media dei dati osservati (Schäfli and Gupta, 2007):

$$NASH = 1 - \frac{\sum [q_{obs}(t) - q_{sim}(t)]^2}{\sum [q_{obs}(t) - \bar{q}_{obs}]^2} \quad (5)$$

In (5) $q_{obs}(t)$ rappresenta il deflusso osservato all'istante t , mentre $q_{sim}(t)$ è la simulazione corrispondente per lo stesso istante. \bar{q}_{obs} è la media dei deflussi osservati nel periodo N . NASH può assumere valori nell'intervallo $[-\infty, 1]$. Ogni valore positivo corrisponde ad un incremento della qualità della previsione rispetto al valor medio.

Generalmente si parla di simulazioni buone se NASH è superiore a 0.5. Un altro indice di verifica spesso utilizzato è la Radice dell'Errore Quadratico Medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (q_{sim}(t) - q_{obs}(t))^2}{N}} \quad (6)$$

RMSE permette di quantificare la dimensione dello scarto tra deflussi simulati ed osservati. NASH può assumere valori compresi $[0, \infty]$. RMSE deve essere minimizzata per avere migliore corrispondenza tra dati osservati e simulati.

1.3 Accoppiamento nowcasting con REAL/COSMOCH7

Il "nowcasting" REAL/PREVAH viene aggiornato ogni ora dall'aprile 2007. Nel gennaio 2010 vi è stata un'evoluzione di tale prodotto. Al termine dell'input in tempo reale di REAL, gli input vengono prolungati concatenando i dati osservati da MeteoSvizzera con una previsione di tre giorni ottenuta dal modello COSMO-CH7. Contrariamente a quanto fatto nell'ambito di MAP D-PHASE (Zappa et al., 2008), dove COSMO-CH7 è stato concatenato una volta al giorno con i dati osservati fino a mezzanotte del giorno antecedente alla previsione, nell'ambito del progetto FLORA è stata creata una seconda catena previsionale dove i dati osservati fino all'ora precedente sono "allacciati" all'ultima previsione di COSMO-CH7. Questa catena è calcolata ogni ora, sia con un "nowcasting" deterministico, sia con un "nowcasting" probabilistico ottenuto dall'uso di REAL (Figura 3.5).

Allo stato attuale le previsioni con questo tipo di configurazione (con REAL) vengono aggiornate ogni ora per i seguenti bacini: Brenno a Loderio; Calancasca a Buseno; Maggia a Locarno-Solduno; Moesa a Lumino; Ticino a Bellinzona; Verzasca a Lavertezzo; Pincascia a Lavertezzo e Lago di Vogorno.

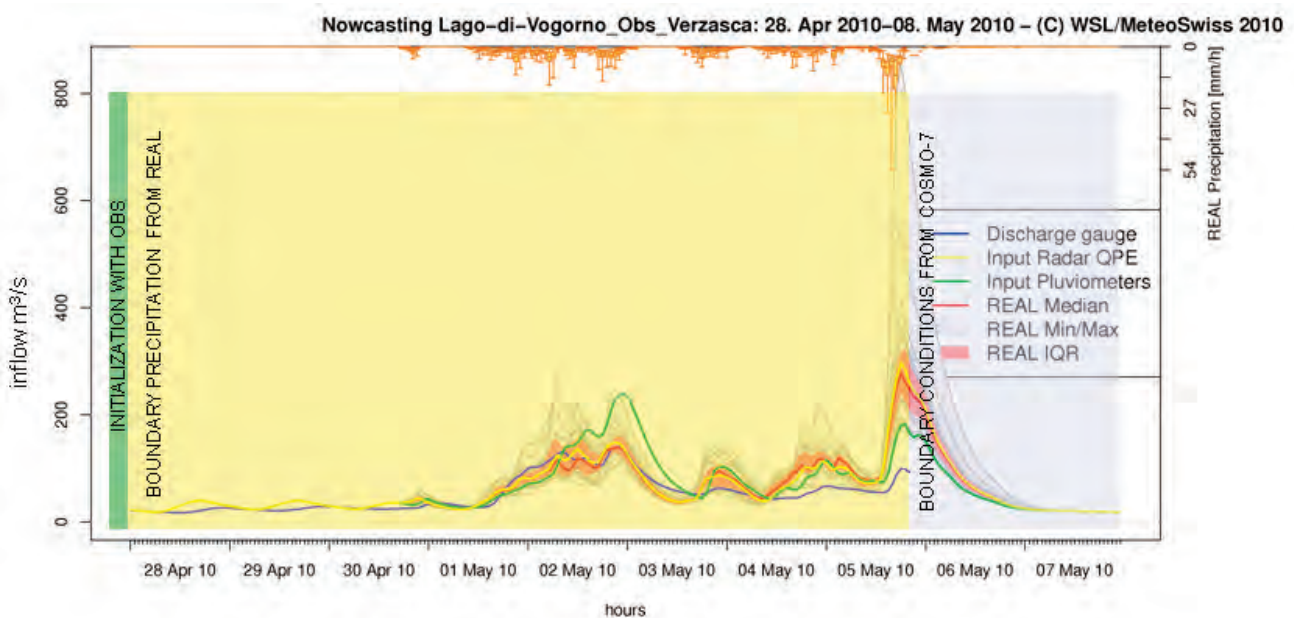


Figura 3.5: Simulazione in tempo reale per uno dei bacini in cui PREVAH è accoppiato con REAL per un "nowcast" probabilistico e con COSMOCH7 per una previsione dei tre giorni a seguire. Sinistra: serie osservate (blu) e simulate dei deflussi del bacino del Lago di Vogorno, bacino idrografico della Verzasca. L'idrogramma verde mostra la simulazione che fa uso dei dati pluviometrici osservati da stazioni al suolo. La linea gialla mostra le simulazioni che usano i dati del radar meteorologico. I valori ottenuti usando REAL sono poco visibili a causa della mancanza di precipitazioni liquide nei giorni precedenti. Le barre poste sull'asse "x" superiore mostrano le precipitazioni ensemble di REAL (fino al termine della fase di "nowcasting") e quelle deterministiche di COSMOCH7. La linea blu dei deflussi osservati termina 1 ora prima del momento in cui la simulazione è lanciata. I dati simulati per le ore seguenti si basano sull'accoppiamento di COSMOCH7 con le simulazioni in tempo reale per ogni membro di REAL e per i dati pluviometrici e il radar deterministico.

Una configurazione solo con radar deterministico e dati pluviometrici (le linee gialle e verdi nella Figura 3.5) viene aggiornata ogni ora anche per i seguenti bacini: Tresa a Ponte Tresa; Afflussi al Lago Ceresio; Toce a Candoglia e Ticino a Miorina.

1.4 Accoppiamento nowcasting con NORA/COSMOCH7

Durante gli ultimi mesi del progetto FLORA sono stati eseguiti ulteriori test con metodi ancora più innovativi che permettono di incorporare le previsioni con un anticipo di otto ore del campo di precipitazioni del radar meteorologico nel flusso delle simulazioni idrologiche. Il prodotto NORA (per “Nowcasting Orographic Rainfall using Analogs”) é stato sviluppato da MeteoSvizzera e consiste nell’allestimento di previsioni del campo radar (Panziera et al., 2011). Il sistema NORA prevede l’utilizzo di dati riguardanti il regime dei venti e della stabilità dell’atmosfera per cercare eventi analoghi nel passato. La previsione per le ore a seguire consiste nei campi di pioggia degli eventi passati che meglio corrispondono alle condizioni stimate per l’evento in corso. L’output di NORA fornisce un ensemble di 12 eventi passati (NORA 12 membri), la media dei 12 eventi (NORA MEAN) e una previsione di base che assume che nelle prossime 8 ore il campo di precipitazione sarà identico (persistente) a quello disponibile tramite l’ultima misurazione in tempo reale (NORA PERSISTENCE). La Figura 3.6 mostra la configurazione dell’esperimento volto ad accoppiare il prodotto NORA con il modello idrologico PREVAH.

Inizializzazione tramite dati da reti idrometeorologiche terrestri operazionali

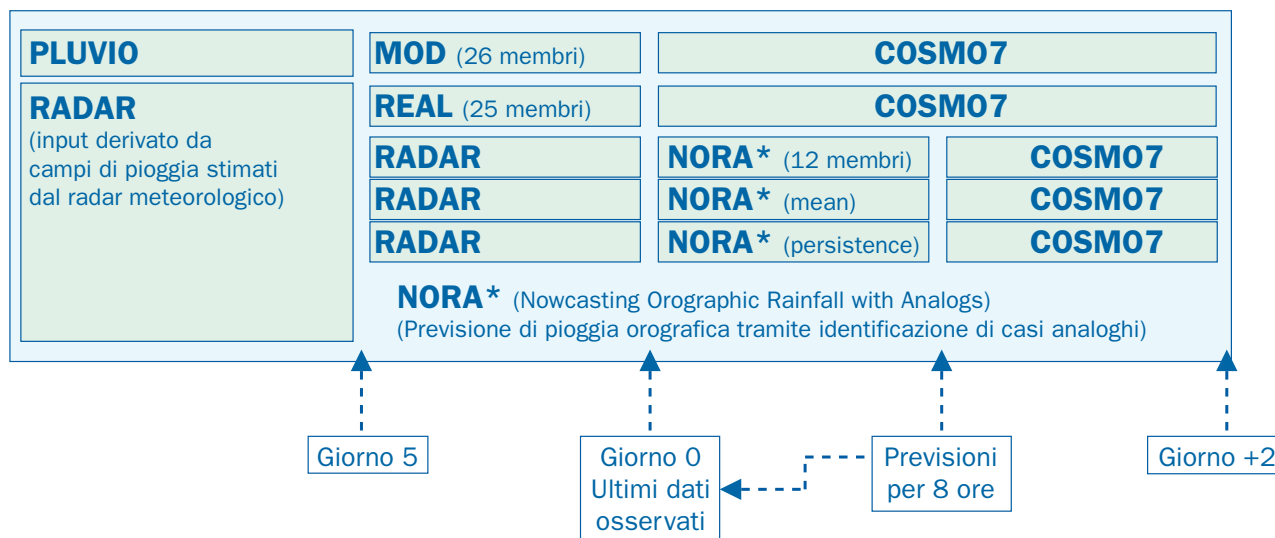


Figura 3.6: Configurazione di previsioni in grado di combinare dati meteorologici da fonti diverse e atti a migliorare la previsione a breve termine.

L’input meteorologico di PREVAH viene assemblato combinando dati osservati (PLUVIO, RADAR), dati di NORA, e dati previsti dal modello meteorologico COSMO7 (vedi anche Figura 3.5). Le previsioni tramite il metodo degli analoghi ottenute tramite NORA sostituiscono le previsioni di COSMO7 nelle prime 8 ore a partire dall’ultimo dato osservato. Questo lasso di 8 ore è il più importante per garantire previsioni di piene improvvise nei bacini di medio-piccole dimensioni. I primi risultati ottenuti dall’applicazione di questa catena previsionale saranno discussi in un’altra sezione di questo rapporto.

2. SIMULAZIONI DETERMINISTICHE SOTTOCENERI

2.1 Analisi e collegamento immagini radar e misure pluviometriche a terra

Per quanto riguarda la regione del Sottoceneri e in particolare il bacino del Lago Ceresio (cfr. Figura 3.7) la situazione concernente la disponibilità di dati è decisamente meno rosea rispetto a quanto descritto riguardo il Sopraceneri. Benché le simulazioni in tempo reale con anticipo fino a 5 giorni per il Fiume Tresa (stazione UFAM Rocchetta) siano disponibili sin dall'aprile del 2007, la possibilità di esaminare simulazioni probabilistiche in tempo reale lanciate da prodotti radar quali REAL non è realizzabile, poiché il dominio di REAL (cfr. Figura 3.2) è circoscritto ai bacini del Ticino, della Verzasca e della Maggia. Inoltre le simulazioni effettuate non tengono attualmente conto del regolamento di gestione del Lago Ceresio. L'effetto di attenuazione delle piene tramite immagazzinamento di grandi volumi d'acqua nel lago è risolto in maniera molto concettuale (serbatoio lineare). Non deve quindi sorprendere che la qualità delle simulazioni ottenuta usando dati ricevuti in tempo reale non raggiunga la qualità riscontrata, per esempio, per il bacino della Verzasca. Le analisi per il Sottoceneri risultano quindi alquanto limitate.

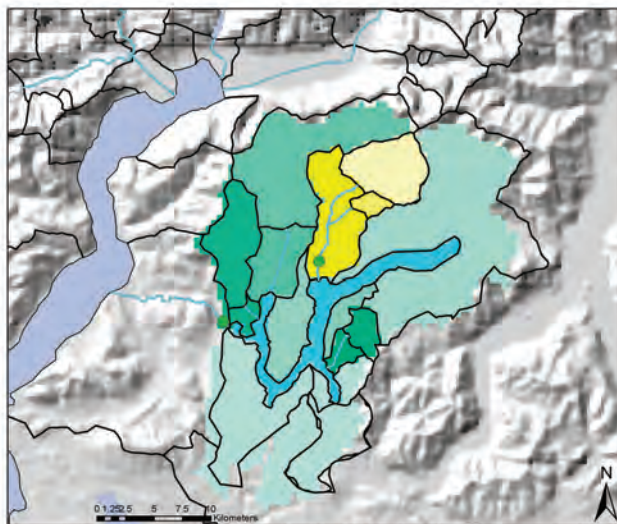


Figura 3.7: Dominio del bacino del Lago di Lugano (615 km²). In giallo è indicata la superficie del bacino del fiume Cassarate (73.9 km²), che rappresenta un importante sottobacino del sistema complessivo.

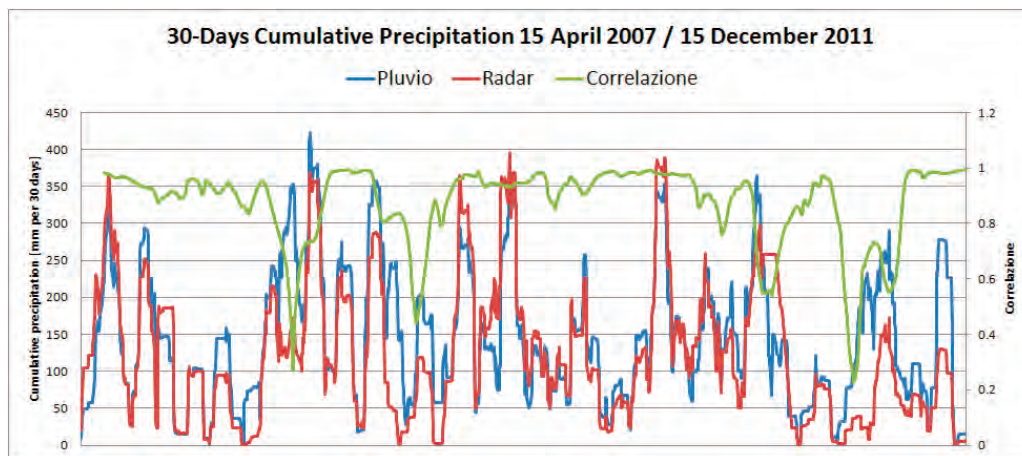


Figura 3.8: Bacino del Lago Ceresio, aprile 2007 – dicembre 2011. Visualizzazione della correlazione (linea verde) su un lasso di 90 giorni delle somme mensili (30 giorni, centrate su ogni giorno) di precipitazione ottenute tramite interpolazione di dati pluviometrici (linea blu) e assimilazione di dati radar (linea rossa).

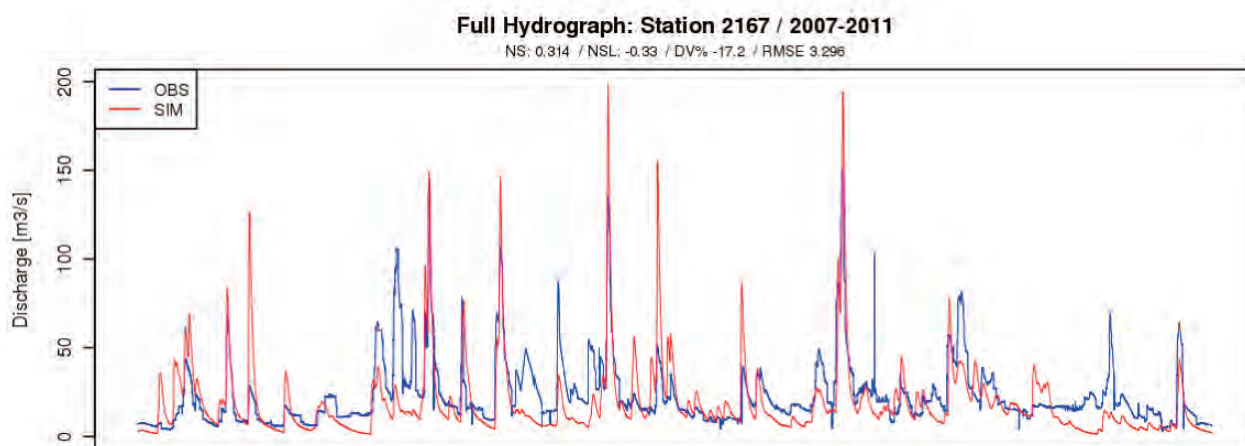
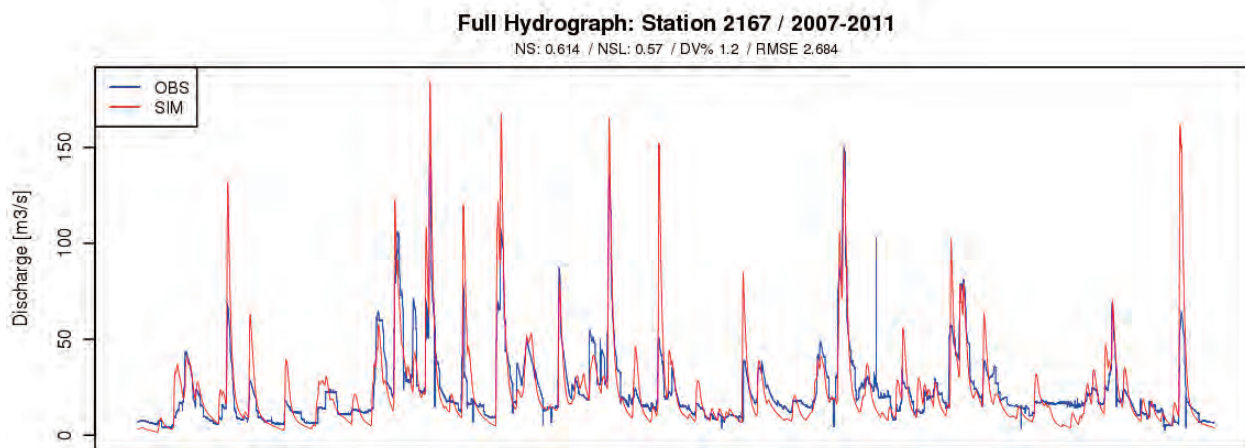
Osservando la corrispondenza tra i dati ottenuti interpolando valori misurati dalla rete pluviometrica ed i valori di radar QPE (valori accumulati per 30 giorni, Figura 3.8) durante tutto l'arco di tempo disponibile, si nota che tale correlazione risulta molto alta (> 0.9) nel 2007 e per un lungo periodo tra l'autunno 2008 e la fine dell'estate 2010. Nel periodo in cui il radar del Monte Lema è stato disattivato (maggio-giugno 2011), la correlazione è diminuita radicalmente a valori molto bassi, poiché il segnale radar usato proveniva dal radar dell'Albis, situato nei pressi di Zurigo. Dall'agosto del 2011 il radar del Monte Lema è stato riattivato con uno strumento di nuova generazione e la correlazione con i dati pluviometrici è subito risalita a livelli molto alti. Si nota però che a partire da agosto 2011 le somme mensili misurate con il radar sono circa la metà di quelle ottenute usando dati di stazioni pluviometriche. Si conclude che l'introduzione del nuovo strumento radar richiederà nei prossimi mesi una nuova calibrazione tra la riflettività misurata dal radar e le misure pluviometriche a terra.

2.2 Nowcasting deterministico

In Figura 3.9 è mostrata l'analisi delle simulazioni ottenute usando dati ricevuti in tempo reale (radar e pluviometri) per i bacini dei fiumi Tresa e Cassarate per il periodo 2006-2011.

Come ricordato precedentemente, nel modello idrologico non è ancora implementata una routine per simulare la regolazione del livello del Lago di Lugano eseguita dall'Ufficio dei corsi d'acqua tramite lo sbarramento di Ponte Tresa. Questa mancanza limita la qualità delle simulazioni ottenute per il fiume Tresa, mentre le simulazioni per il fiume Cassarate soffrono del fatto che il modello non è stato calibrato localmente, ma solo con l'obiettivo di ottenere una buona simulazione per tutto il bacino del Lago Ceresio.

La qualità delle simulazioni ottenute usando dati pluviometrici risulta nettamente superiore a quella ottenuta usando dati radar. Il modello tende spesso a sovrastimare i picchi delle piene. È sintomatico notare che in media i deflussi simulati per tutto il bacino differiscano solo dell'1.2%, se confrontati con le misurazioni, mentre per quanto riguarda il Cassarate il modello fornisce circa il 15% di deflussi in più rispetto al dato misurato.



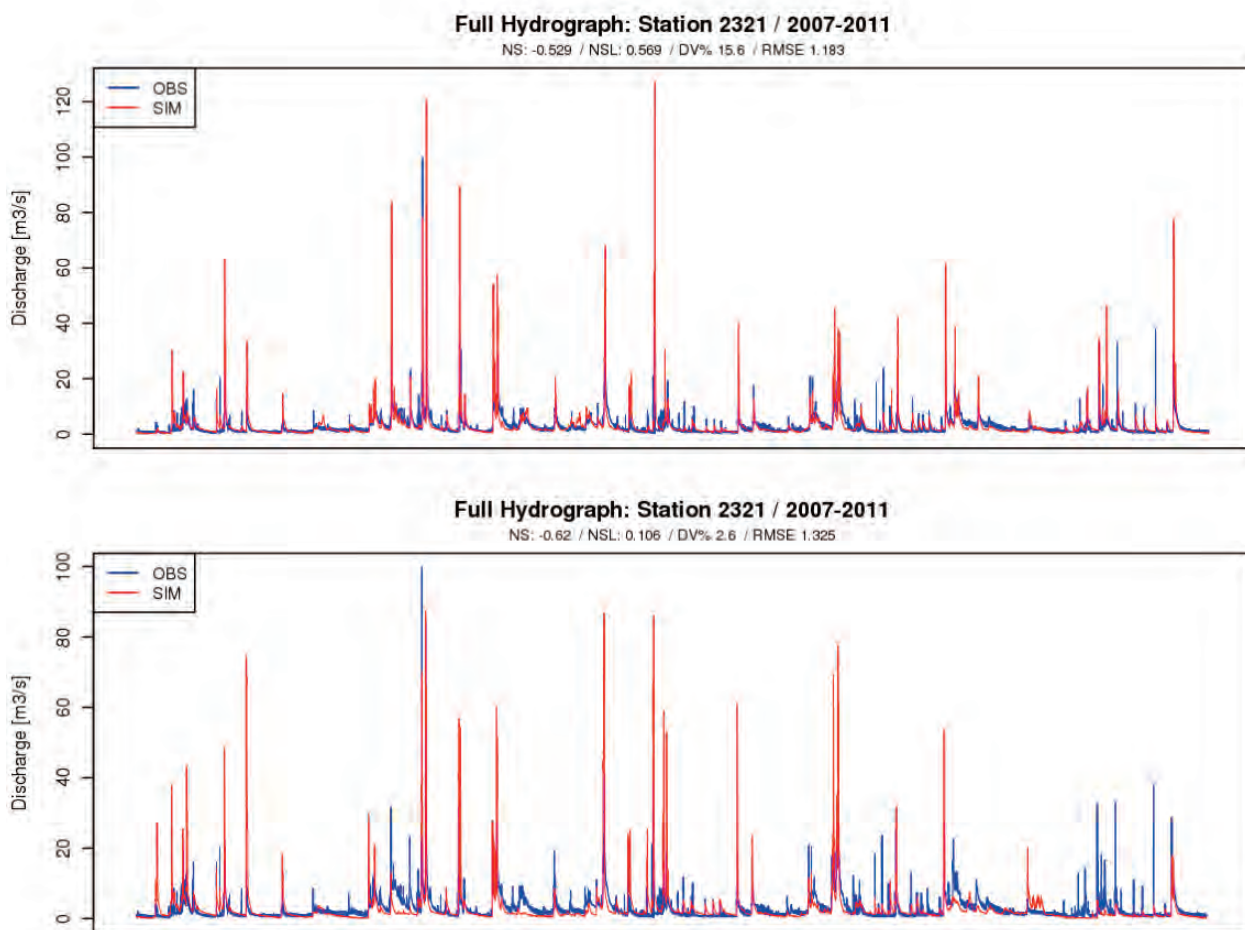


Figura 3.9: Simulazioni con dati operazionali dal 1 aprile 2007 al 31 dicembre 2011 per i bacini della Tresa (prime due immagini) e del Cassarate (terza e quarta immagine). La prima immagine di ogni bacino mostra i risultati ottenuti lanciando PREVAH con dati ottenuti in tempo reale da reti pluviometriche. Le seconde immagini mostrano i risultati ottenuti con l'assimilazione dei dati del radar meteorologico nel modello idrologico.

Tale differenza sembra indicare che la rete di pluviometri usata per la stima delle precipitazioni non sia ottimale per tutto il comprensorio analizzato, ma solo per tutto il bacino del fiume Tresa.

3. ANALISI SCIENTIFICA SIMULAZIONI 2007-2010

L'analisi statistica è stata eseguita su quattro bacini di dimensioni differenti (Sezione 2.3.1): Pincascia, Verzasca, Maggia (Locarno-Solduno) e Ticino (Bellinzona). Il bacino del Riale Pincascia ha un'area di 44 km² ed è un affluente del fiume Verzasca, che presenta una superficie complessiva di 186 km² e un regime di deflusso sostanzialmente naturale, non essendo presenti rilevanti attività antropiche al suo interno.

Il bacino del fiume Maggia copre un'area di 926 km². I suoi deflussi sono, al contrario, fortemente alterati dalla presenza di laghi artificiali e centrali idroelettriche. Lo stesso vale anche per il bacino del fiume Ticino, che presso la stazione idrometrica di Bellinzona raccoglie i deflussi da un'area di circa 1515 km². Oltre alle infrastrutture idroelettriche la valle del fiume Ticino è anche sede di molte attività industriali ed è attraversata da importanti linee stradali e ferroviarie.

3.1 Nowcasting con REAL e con input deterministici

Nel caso dei membri deterministici i valori degli indici BSS, FAR e POD (calcolati per la soglia dei quantili 0.80 e 0.95) sono costanti al variare del lasso di tempo considerato per propagare i dati radar/pluviometrici tramite il modello idrologico. Al contrario, nel caso delle simulazioni con 25 membri di REAL si può osservare che la qualità delle simulazioni varia leggermente in funzione del lasso di tempo lasciato a partire dall'inizializzazione del modello idrologico. I membri di REAL divergono sempre più e questo ha un effetto sulla statistica dei risultati (Cfr. Figura 3.10).

Analizzando in dettaglio i risultati per i diversi indici si può osservare quanto segue:

BSS: quasi tutti i tipi di input per la stima di piene in tempo reale generano dati con BSS superiore a "0". Solo nel caso del quantile 0.8 per il fiume Maggia si ottengono valori negativi, segno di scarsa qualità del prodotto. I valori ottenuti per il quantile 0.95 sono di regola superiori a quelli calcolati per il quantile 0.8. Questo è un segnale incoraggiante, visto che i prodotti devono soprattutto avere qualità per eventi rari. Se si osservano i valori di BSS in funzione del lasso di tempo dato a REAL per propagarsi, si può notare un calo di qualità se questo lasso supera gli 8 giorni. L'uso di REAL permette di ottenere in tutti e quattro i bacini e le due soglie considerate, risultati superiori rispetto all'uso del prodotto radar QPE standard. Rispetto ai risultati conseguiti usando dati pluviometrici, REAL si dimostra superiore in molti casi, ma non sempre. Ad esempio nel bacino della Maggia le simulazioni basate su input da pluviometro si dimostrano superiori a REAL.

FAR: nel caso del quantile 0.8 i valori del coefficiente FAR ottenuti con i tre tipi di input (radar QPE, REAL e pluviometri) sono molto simili. Nel piccolo bacino del torrente Pincascia si osservano pochi "falsi allarmi", mentre per la Maggia l'uso di modelli indica un numero di eventi troppo elevato.

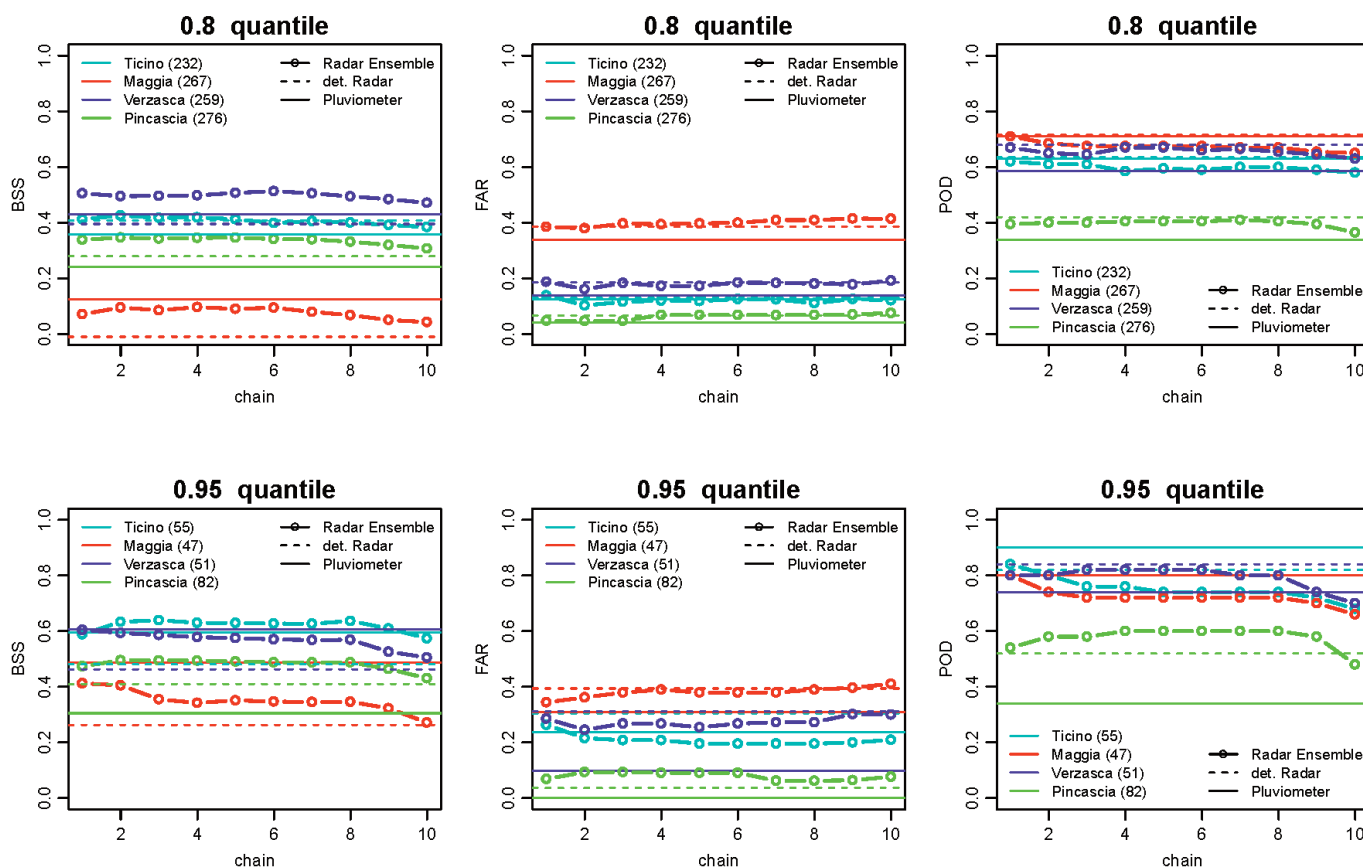


Figura 3.10: Brier Skill Score (BSS), False alarm ratio (FAR) e Probability of detection (POD) per quattro bacini con area diversa. La qualità delle simulazioni viene calcolata per tre tipi di dati input (radar ensemble REAL, pluviometri e radar deterministico) e per due soglie di deflussi (quantili 0.8, sopra e 0.95, sotto). (Liechti et al., 2012a)

Il numero di "falsi allarmi" si incrementa se si considera il quantile 0.95. Soprattutto nel caso di Verzasca e Ticino si osserva un aumento di eventi previsti, ma non confermati dalle misurazioni. Il valore di FAR cresce se REAL si propaga per oltre 8 giorni. Questo significa che l'ampiezza dell'ensemble cresce troppo.

POD: i valori di POD ottenuti per i bacini Verzasca, Maggia e Ticino risultano simili. Oltre il 70% degli eventi osservati viene simulato correttamente per entrambe le soglie considerate. Nel caso della Pincascia si osserva il rovescio della medaglia rispetto a quanto visto sotto forma di FAR. Sembra che le simulazioni forniscano spesso risultati di picchi di deflusso troppo bassi, solo il 40% degli eventi viene identificato correttamente. Questo é un segnale che conferma la difficoltà di effettuare previsioni adeguate in piccoli bacini privi di dati pluviometrici in tempo reale.

Rank histogram: gli istogrammi presentati nella Figura 3.11 mostrano l'effetto di "underdispersion", vale a dire che la gran parte dei dati osservati si trova all'esterno della banda di oscillazione calcolata da REAL/PREVAH. Il fenomeno si presenta soprattutto per il quantile 0.8 ed i maggiori problemi vengono riscontrati per il bacino della Pincascia. Nel caso del quantile 0.95 l'ensemble generato con REAL/PREVAH mostra una distribuzione più regolare, soprattutto nel caso dei bacini del Ticino e della Verzasca. Questo indica che REAL/PREVAH sono in grado di generare simulazioni utili in caso di piene "estreme".

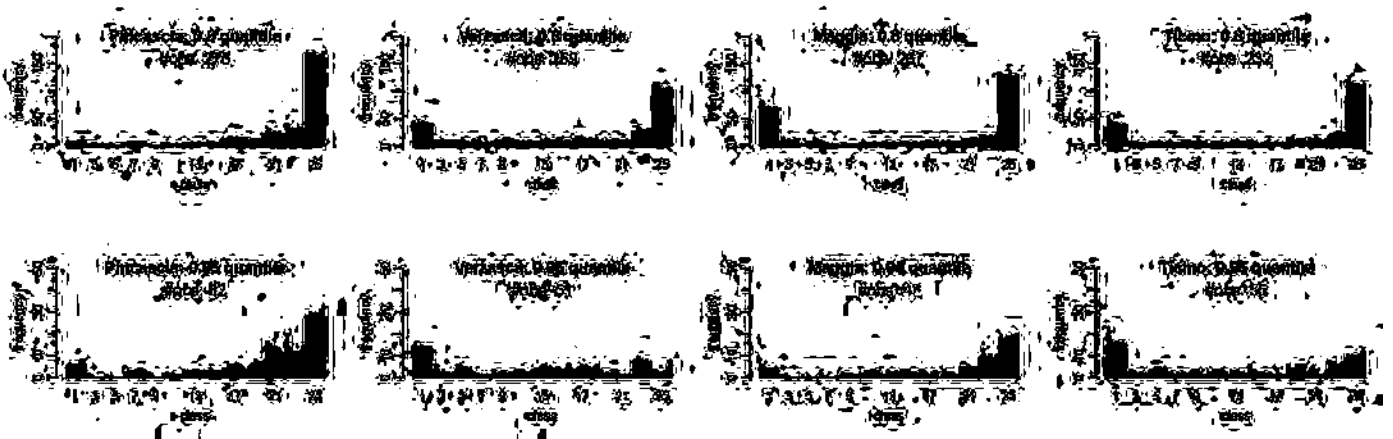


Figura 3.11: Rank histograms per i quantili 0.8 and 0.95. Le colonne presentano i risultati per differenti lassi di tempo dati a REAL per sviluppare la sua "fascia d'oscillazione". (Liechti et al., 2012a)

3.2 Plusvalore per bacini non osservati

Essendo il bacino del torrente Pincascia interamente inglobato nel bacino della Verzasca, esiste la possibilità di valutare la qualità delle simulazioni calibrate per la Verzasca anche per una sottoregione le cui simulazioni non sono state specificamente calibrate. La Figura 3.12 mostra un'analisi probabilistica della qualità della previsione dei deflussi ottenuta usando differenti tipi di input e considerando differenti fonti di incertezza:

- PLU: simulazioni alimentate da dati pluviometrici;
- PPE: come PLU, ma con 26 varianti di parametri calibrati (ensemble parametrico);
- RAD: simulazioni alimentate da dati radar;
- RPE: come RAD, ma con 26 varianti di parametri calibrati (ensemble parametrico);
- REAL: come RAD, ma con 25 varianti che descrivono le incertezze derivanti dalla stima del valore delle precipitazioni usando il segnale radar.

I risultati delle analisi sono riportati per diversi livelli di deflusso (dal percentile 0.60 al percentile 0.95). I risultati confermano che le performance ottenute utilizzando come input il prodotto REAL sono sempre superiori a RAD, indipendentemente dalla dimensione del bacino e dalla soglia di deflussi scelte per l'analisi. L'uso di un ensemble di realizzazioni di parametri (PPE e RPE) migliora sempre la qualità delle previsioni rispetto a simulazioni basate su un'unica variante per la descrizione dei parametri del modello idrologico PREVAH. Nel bacino della Verzasca REAL è superiore a PLU e molto simile a PPE sino ad una soglia di deflussi pari al percentile 0.9. Per eventi più rari PLU e PPE sono superiori. Per quanto riguarda la Pincascia REAL è sempre superiore a PLU e PPE. Questo indica che REAL ha effettivamente un plusvalore se si desidera ottenere previsioni in tempo reale per bacini di piccole dimensioni privi di pluviometri che danno indicazioni in tempo reale sull'intensità delle piogge.

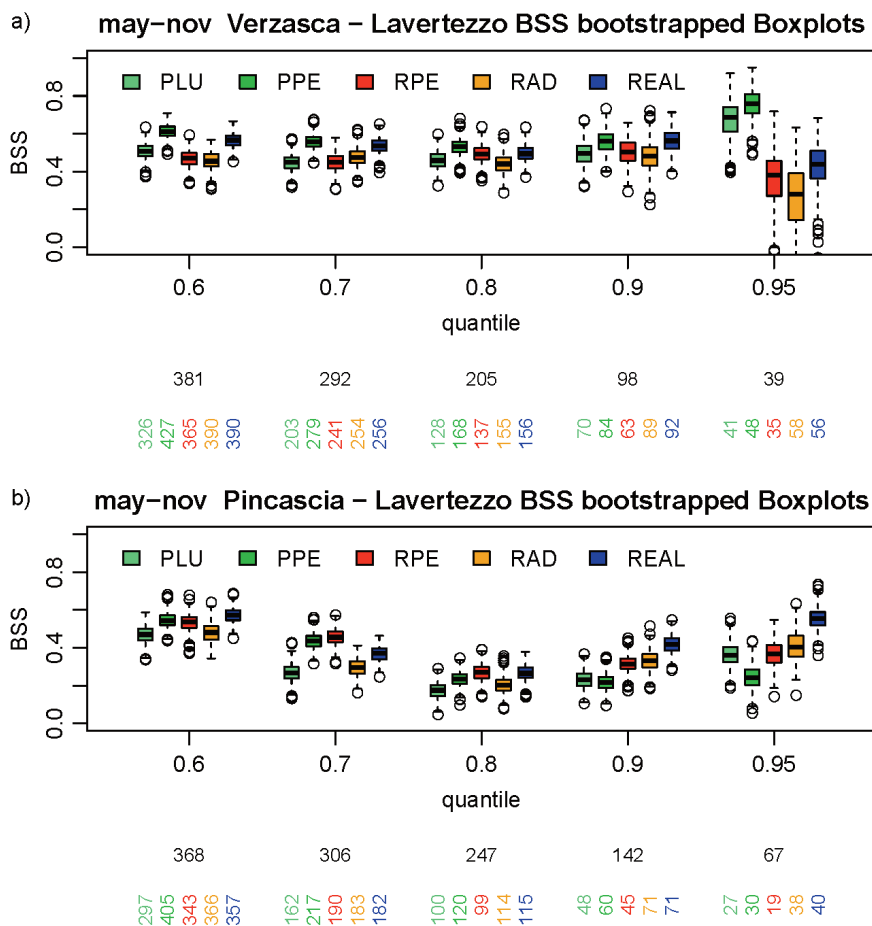


Figura 3.12: Brier Skill Score (BSS) analizzato per diverse soglie di deflusso (percentili 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 e 0.95) per i bacini del fiume Verzasca (immagine superiore) e del torrente Pincascia (immagine inferiore). Le sigle PLU, PPE, RPE, RAD e REAL sono definite nel test principale (Liechti et al., 2012b). Gli intervalli di confidenza sono stati derivati tramite "bootstrapping".

3.3 Nowcasting con REAL e con input deterministici accoppiati a COSMOCH7

Il concetto sperimentale presentato nella Figura 3.10 viene calcolato ed aggiornato ogni ora in tempo reale a partire dal gennaio 2010. Un esperimento simile, ma senza l'accoppiamento con COSMO7 è aggiornato ogni ora a partire dall'aprile del 2007. Alcuni dati mancanti e diversi bacini sono stati ricalcolati dopo aver corretto periodi mancanti.

L'accoppiamento con COSMO7 permette di estendere la capacità previsionale delle simulazioni in tempo reale da poche ore (l'inerzia del bacino) ad oltre 2 giorni. Con questo tipo di configurazioni è possibile stimare: a) se conviene identificare i membri di REAL con maggior correlazione con i dati osservati prima di combinare le serie osservate con COSMO7 (riduzione dei membri) e, b) se questa scelta permette di ridurre l'incertezza delle previsioni e consente di migliorare la qualità delle previsioni di deflussi.

A questo fine l'analisi dei risultati è stata suddivisa in due sezioni distinte:

- il periodo antecedente (Hindcast period), dove PREVAH è alimentato da REAL (da 8 giorni antecedenti le previsioni fino al momento in cui PREVAH è accoppiato a COSMO7);
- il periodo della previsione con PREVAH alimentato da COSMO7 per un lasso di tempo di 48 ore.

La Figura 3.13 mostra i risultati ottenuti analizzando questo esperimento. A tal proposito sono stati calcolati per ogni membro ed ogni giorno il coefficiente di NASH (Nash and Sutcliffe, 1970) e la Radice dell'Errore Quadratico Medio (RMSE). Per ogni previsione con questi valori è stato determinato il rango di ogni membro (dal migliore al peggiore) ed infine è stata calcolata la media dei valori degli indici NASH e RMSE per ognuno dei 25 ranghi possibili nell'arco del periodo considerato.

Sia il criterio di NASH che il valore RMSE ottenuti indicano che è possibile creare un ordinamento dei membri simulati combinando PREVAH e REAL nei giorni antecedenti ad una previsione. Scegliendo sempre i membri con NASH e RMSE migliori otteniamo un NASH-medio di 0.81 ed un valore di RMSE di $6.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

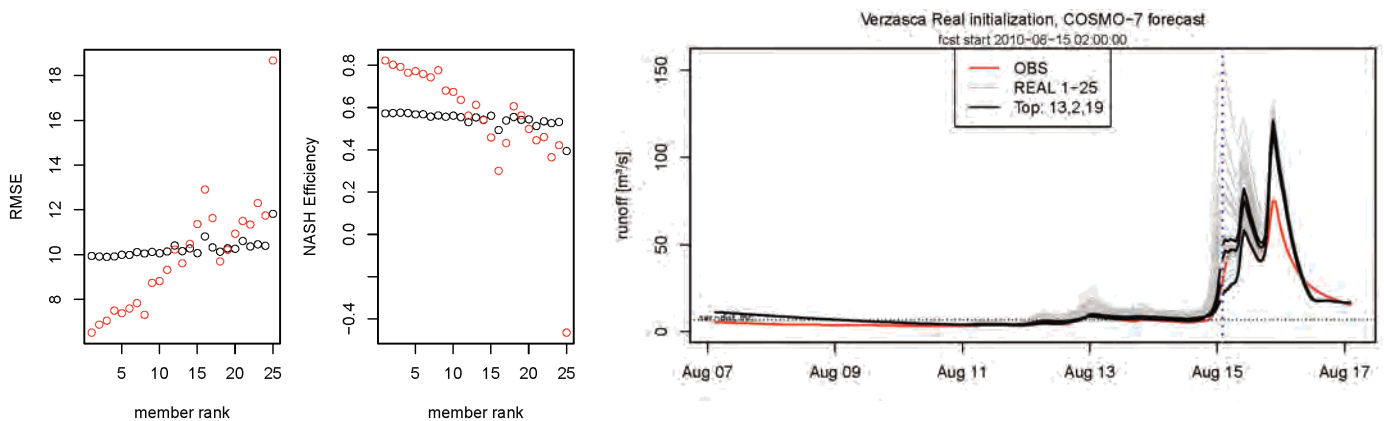


Figura 3.13: Sinistra: analisi della qualità media di membri di PREVAH/REAL (da 1, il migliore, a 25, il peggiore) in funzione del loro rango durante il periodo antecedente ad una previsione (simboli rossi) e durante la previsione per le prossime 48 ore (simboli neri). Destra: idrogramma delle simulazioni PREVAH/REAL (linee grigie) per un evento nell'Agosto del 2010. Le linee nere identificano i tre membri di PREVAH/REAL con una migliore qualità durante il periodo antecedente all'inizializzazione della previsione (a sinistra della linea verticale). I dati osservati sono visualizzati in rosso.

Scegliendo invece di osservare il membro mediano della classifica (il numero 13), allora otterremmo un valore di NASH di 0.58 e di RMSE pari a $9.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Si può pertanto concludere che analizzando il periodo antecedente è possibile identificare i membri di PREVAH/REAL con il maggior potenziale per originare previsioni accurate. Questo criterio si basa sull'ipotesi forte che questa qualità si propaghi anche nel periodo della previsione con PREVAH accoppiato a COSMO7. In media i membri con rango da 1 a 7 hanno una buona qualità. Si potrebbe

quindi dedurre che non è sempre opportuno calcolare tutti i 25 membri di REAL, visto che è possibile ridurre a priori le varianti analizzando il recente passato.

Persistono tuttavia dei problemi anche con questo approccio. Infatti se si guarda alla qualità delle simulazioni dopo aver accoppiato PREVAH con COSMO7, si deve notare che la superiorità dei primi 7 membri svanisce molto in fretta. Quasi tutti i membri hanno un NASH di circa 0.58 ed una RMSE di 10-11 m³/s. Non è dunque possibile “propagare” delle buone condizioni iniziali per il periodo della previsione. Ciò conferma quanto scritto da Zappa et al., (2011), che avevano già individuato che le condizioni iniziali hanno un effetto solo sulle prime ore di una previsione. La qualità delle previsioni è quindi determinante per la qualità delle simulazioni idrologiche durante il periodo della previsione.

Per concludere questa analisi è però importante sottolineare come esistano sicuramente casi in cui la scelta di membri ha un effetto positivo sulla qualità delle previsioni, soprattutto se la scelta avviene nel momento in cui i deflussi stanno salendo (parte destra della Figura 3.13). Nel caso dell'evento di agosto 2010 si può notare come i tre miglior membri nel periodo antecedente siano anche i migliori membri nei due giorni in cui PREVAH è alimentato da COSMO7.

4. USO DI NORA ACCOPPIATO A PREVAH

Nella sezione 1.1.4 si è descritto come sia possibile usare un nuovo tipo di prodotti radar per migliorare la qualità delle previsioni di pioggia per le prime ore di un evento in cui il forcing orografico determina la distribuzione spazio-temporale delle precipitazioni (metodo NORA di MeteoSvizzera). Sino ad ora solo pochi eventi sono stati calcolati. La Figura 3.14 mostra un esempio di come l'utilizzo di previsioni ensemble con NORA permetta di ovviare ai problemi mostrati dal passaggio dai dati osservati alle previsioni alimentate da COSMO7.

Il picco di deflussi per un evento nel novembre del 2008 nei bacini del Ticino e della Verzasca viene previsto con miglior qualità dai prodotti NORA (MEAN, ENSEMBLE e PERSISTENCE). Le simulazioni che usano COSMO7 determinano, al contrario, una sovrastima del picco massimo.

Nel caso di un secondo evento (giugno 2009), i prodotti NORA e COSMO7 forniscono un risultato simile. Il prodotto NORA ENSEMBLE è però l'unico che è in grado di inglobare completamente il picco di deflussi osservato. Il valore prettamente soggettivo della qualità delle simulazioni di PREVAH alimentato da NORA dovrà essere approfondito con analisi quantitative. Lavori in tale direzione sono ancora in corso e una realizzazione in tempo reale con i prodotti NORA MEAN e NORA PERSISTENCE è in fase di allestimento.

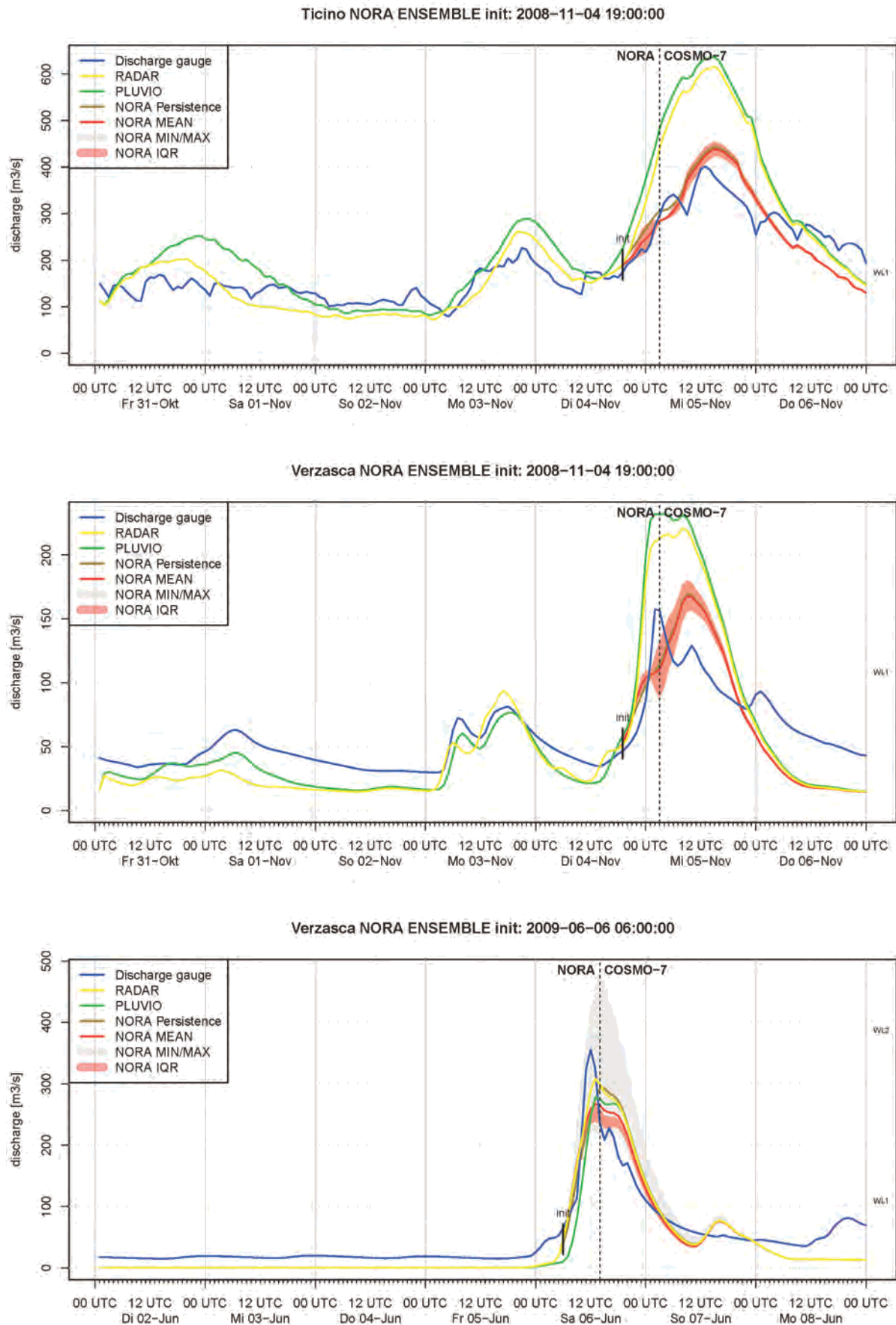


Figura 3.14: Nuovi prodotti alla base del radar meteorologico (NORA) permettono di eseguire previsioni idrologiche per le prossime 5-8 ore con PREVAH. I prodotti radar hanno una risoluzione spaziale molto più elevata dei prodotti COSMO. Esempi: 4 novembre 2008: Ticino (Bellinzona, prima immagine) e Verzasca (Lavertezzo, immagine centrale). 6 giugno 2009: Verzasca (Lavertezzo, ultima immagine)

5. PREVISIONI OPERAZIONALI

Già nell'ambito del progetto MAP D-PHASE (Zappa et al., 2008) l'Istituto WSL, MeteoSvizzera e il Politecnico di Zurigo (ETHZ) hanno implementato un nuovo sistema per le previsioni dei deflussi basato sull'accoppiamento in tempo reale di un modello idrologico (PREVAH - Viviroli et al., 2009) con dati meteorologici (inclusi dati radar) e previsioni meteo derivate da modelli numerici (COSMOCH2, COSMOCH7 e COSMO-LEPS).

I modelli della serie COSMO sono gestiti da MeteoSvizzera. COSMOCH2 è un modello deterministico con una risoluzione orizzontale di 2 km e fornisce ogni tre ore delle previsioni ad alta risoluzione per le 24 ore a seguire. COSMOCH2 è particolarmente adatto per seguire l'evoluzione di un evento già in corso. COSMOCH7, anch'esso deterministico, ha una risoluzione orizzontale di 7 km e viene lanciato due volte al giorno. COSMOCH7 fornisce previsioni per le 72 ore seguenti l'orario di inizializzazione. Questo tipo d'informazione è particolarmente utile per ottenere indicazioni su possibili eventi con 2-3 giorni d'anticipo.

COSMO-LEPS è un modello probabilistico che fornisce una volta al giorno previsioni per le prossime 132 ore. La risoluzione orizzontale di COSMO-LEPS è stata di 10 km fino al termine del 2009 e dal 2010 la risoluzione è salita a 7 km. Caratteristica peculiare di COSMO-LEPS è che sulle basi di 102 previsioni globali vengono realizzate, dopo aver ridotto il campione iniziale di previsioni, 16 previsioni equamente probabili (Jaun and Ahrens, 2009). Accoppiando queste 16 varianti per la previsione dei prossimi 5 giorni con il modello idrologico si ottiene una serie di possibili evoluzioni dei deflussi in una regione con un largo anticipo di tempo. Questo permette nuove strategie per gestire il pre-allarme ed i preparativi atti a limitare danni dovuti allo straripamento di laghi e fiumi. PREVAH è un modello idrologico semi-distribuito utilizzato da numerosi gruppi di ricerca in Svizzera ed in Europa per lavori di ricerca legati all'idrologia di regioni alpine. La risoluzione delle simulazioni con PREVAH varia al variare delle dimensioni dei bacini imbriferi da analizzare. Generalmente la risoluzione varia tra i 100 e i 500 m. Dal 2005 PREVAH è implementato quale componente del sistema IFKIS-HYDRO (Romang et al., 2011). Durante il progetto D-PHASE PREVAH è stato accoppiato a modelli di previsioni meteo sopra descritti oltre che per la Linth (Canton Glarona) anche per la Thur e per il bacino del Lago Maggiore. Durante MAP D-PHASE le previsioni con PREVAH accoppiato ai modelli meteorologici esposti in precedenza avvenivano unicamente una volta al giorno, alle 00:00 UTC. Dal luglio 2011 COSMOCH2 viene aggiornato ogni tre ore, mentre COSMOCH7 viene calcolato oltre che alle 00:00 UTC anche alle 07:00 UTC ed alle 12:00 UTC. Questo incremento del numero di previsioni ha permesso di creare nuove visualizzazioni dei modelli deterministici COSMOCH2 e COSMOCH7 che includono le ultime previsioni in un solo grafico. Questo tipo di grafici è chiamato "time-lagged ensemble". Le simulazioni riportate nelle Figure 3.16 e 3.17 mostrano il nuovo tipo di visualizzazioni, disponibile nell'ambito del progetto FLORA dal luglio 2011.

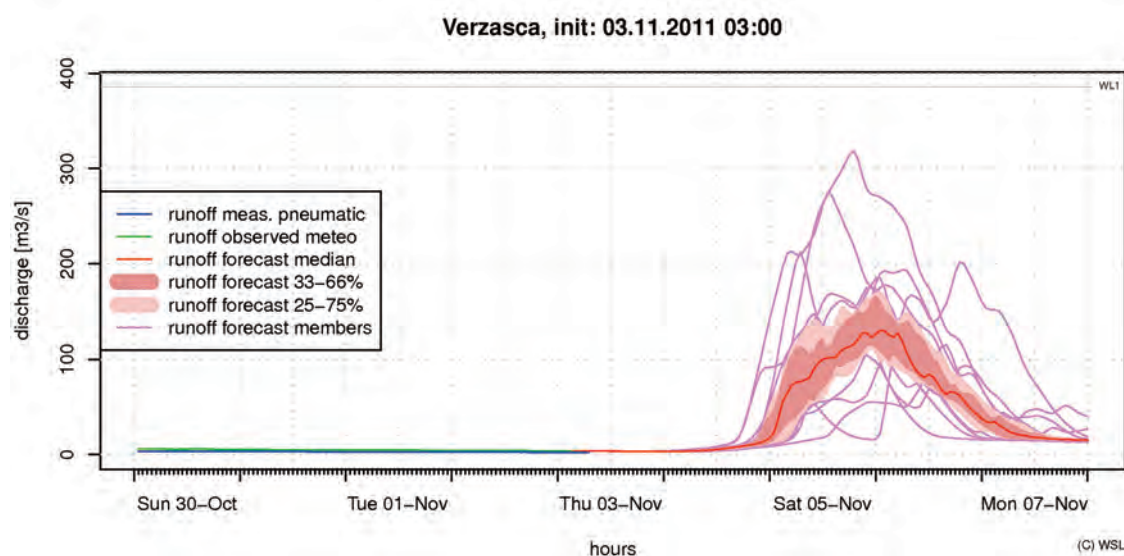


Figura 3.15: Previsione idrologica con input pluviometrico da COSMO-LEPS iniziato 3.11.2011. Due giorni prima dell'evento che ha avuto un picco di 199 m³/s alle 7:40 del 5 novembre 2011.

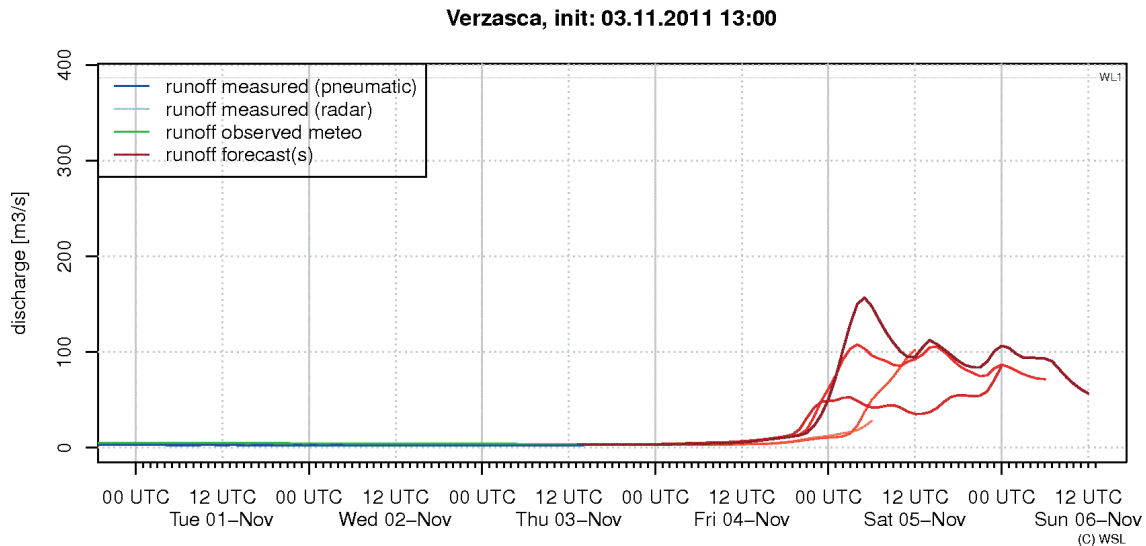


Figura 3.16: Previsione idrologica con input pluviometrico da COSMO 7. Inizializzazione alle 13:00 del 3.11.2011 circa 42 ore prima il deflusso massimo che ha raggiunto un picco di 199 m³/s alle 7:40 del 5 novembre 2011.

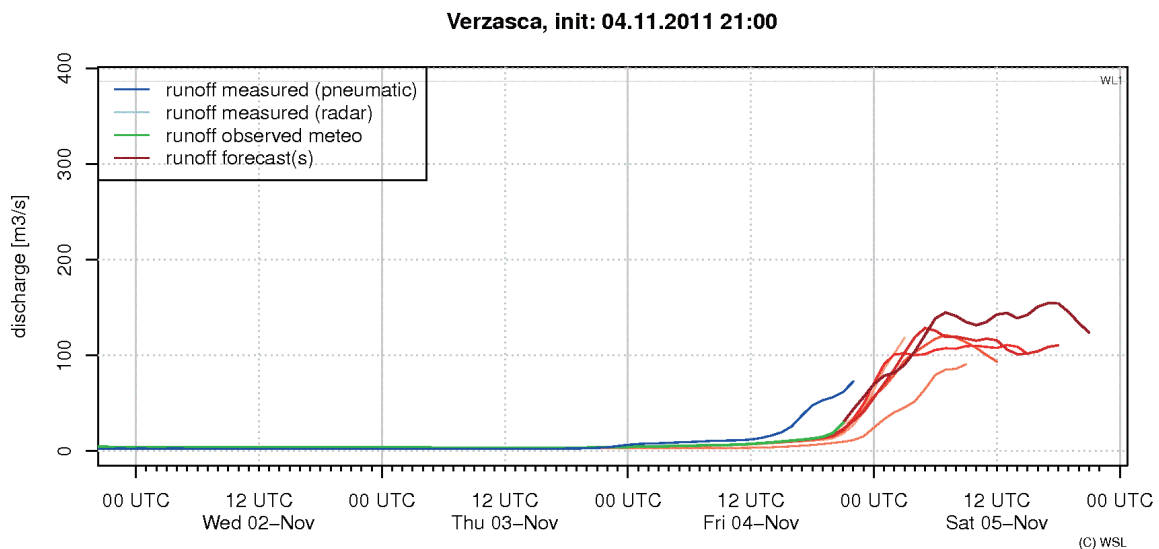


Figura 3.17: Previsione idrologica con input pluviometrico da COSMO 2. Inizializzato alle 21:00 del 4.11.2011 circa 10 ore prima il deflusso massimo che ha avuto un picco di 199 m³/s alle 7:40 del 5 novembre 2011.

Al momento le previsioni sono pubblicate per i seguenti bacini: Brenno a Loderio, Calancasca a Buseno, Maggia a Locarno-Solduno, Moesa a Lumino, Ticino a Bellinzona, Verzasca a Lavertezzo; Cassarate a Lugano-Pregassona, Veduggio ad Agno, Magliasina a Magliaso, Tresa a Ponte Tresa, Toce a Candoglia e Ticino a Sesto Calende.

6. DISSEMINAZIONE DEI RISULTATI

Nell'ambito del progetto FLORA l'Istituto WSL ha continuato le simulazioni operazionali realizzate con le catene realizzate nel progetto MAP D-PHASE. I risultati sono pubblicati in tempo reale su un sito pilota realizzato per la consultazione interna del committente, il Dipartimento del territorio del Cantone Ticino, e per altri utenti autorizzati. I risultati delle simulazioni e le rispettive previsioni idrologiche vengono inviate all'interfaccia GIN (Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren, Piattaforma comune di informazione sui pericoli naturali) realizzata dalla Confederazione Svizzera in cui vengono raccolti e resi disponibili tutti i dati, le informazioni e le previsioni sui pericoli naturali in Svizzera. A questa piattaforma partecipano l'Ufficio Federale di Meteorologia (MeteoSvizzera) con le previsioni meteorologiche e i relativi bollettini, l'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), competente per le previsioni idrologiche e l'Istituto per lo studio della neve e delle valanghe (SLF) di Davos, per quanto riguarda il bollettino delle valanghe. Le Figure 3.18 e 3.19 mostrano esempi di informazioni prodotte nell'ambito di FLORA e visualizzate su GIN.

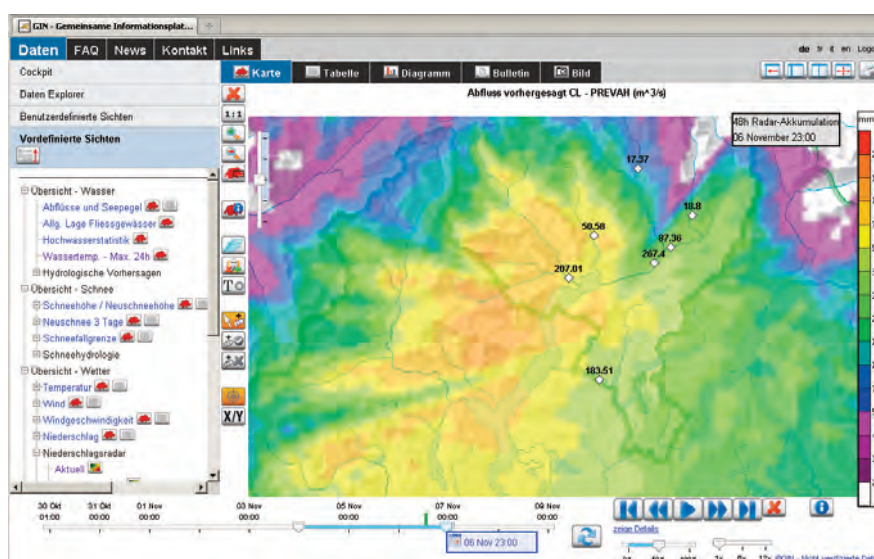


Figura 3.18: Previsioni operazionali del Canton Ticino. Punti di controllo già implementati in GIN. I dati radar mostrano la somma delle precipitazioni tra il 4 ed il 5 novembre 2011.

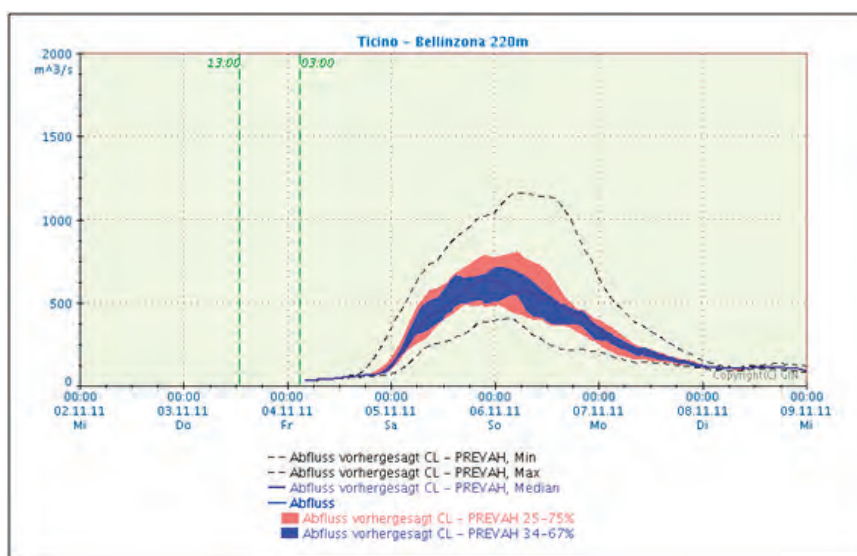


Figura 3.19: Previsioni operazionali del Canton Ticino. Previsione con COSMO-LEPS del 4.11.2011 per il fiume Ticino (stazione Bellinzona), come pubblicata online in GIN.

CONCLUSIONI

L'accoppiamento del modello idrologico PREVAH con i prodotti di MeteoSvizzera REAL, NORA e COSMO7 sono unici nel loro genere. Il progetto FLORA ha reso possibile continuare tali esperimenti innovativi di idrometeorologia operativa atti a migliorare le previsioni di piene improvvise in bacini alpini.

L'uso di REAL (radar probabilistico) per alimentare modelli idrologici come PREVAH ha un plusvalore significativo rispetto all'uso di dati pluviometrici o dei dati del radar tradizionali (Liechti et al., 2012a). Tale plusvalore è ancora più significativo per i bacini di piccole dimensioni, dove spesso non sono presenti pluviometri che forniscono dati in tempo reale (Liechti et al., 2012b). Purtroppo l'uso di REAL comporta configurazioni molto sofisticate (Germann et al., 2009), che per ora non ne permettono l'uso su tutta la scala alpina. Nel Cantone Ticino solo la regione del Sopraceneri dispone al momento di tali dati.

Per la regione del Sottoceneri la disponibilità di dati è ridotta e le qualità delle simulazioni sono meno soddisfacenti. Osservando i dati di precipitazione aggregati per tutto il bacino del Lago Ceresio si è potuto verificare che la correlazione tra dati pluviometrici e dati radar è soggetta a grandi oscillazioni. In particolare, l'introduzione di un radar di nuova generazione nel giugno del 2011 ha causato una rottura nell'omogeneità dei dati radar che dovrà essere ristabilita nei mesi ed anni a seguire.

Le analisi hanno inoltre consentito di dimostrare che per ottenere un miglioramento delle previsioni è sufficiente utilizzare un ensemble dei parametri calibrati del modello (Lichti et al., 2012b; Zappa et al., 2011). Tale approccio si può sicuramente estendere a ogni bacino alpino dove il modello idrologico può essere calibrato tramite confronti con deflussi osservati.

L'uso di REAL per identificare condizioni iniziali migliori ha un grande potenziale (vedi sezione 2.3.3). Purtroppo i bacini alpini hanno tempi di reazione ed inerzia interna molto ridotti (meno di 3 ore), ed è quindi importante avere previsioni meteorologiche di qualità per migliorare la qualità delle previsioni con un anticipo di 48 ore.

A tal fine sono stati sperimentati dati di previsione del campo di pioggia del radar meteorologico (prodotti NORA). Tali previsioni cercano di colmare il deficit nella qualità delle previsioni a corto termine fornendo dati per le prossime 8 ore. Il potenziale di tali prodotti è stato mostrato sotto forma di casi specifici dove NORA è stato in grado di migliorare le previsioni a breve termine. Un'analisi a lungo termine con analisi statistica accurata deve ancora essere realizzata.

Infine il progetto ha permesso di ampliare la gamma di prodotti di previsioni realizzati dalla WSL in tempo reale e di sperimentare nuove vie per disseminare e pubblicare le previsioni di deflusso in tempo reale. Tali attività verranno proseguite nei prossimi anni, sia nell'attività di ricerca di WSL, sia all'interno dei compiti istituzionali dell'Ufficio dei corsi d'acqua del Dipartimento del territorio del Cantone Ticino.

RINGRAZIAMENTI

Le attività descritte e realizzate all'interno del progetto sono state possibili grazie al contributo di diversi soggetti, qui di seguito brevemente ricordati. Le attività scientifiche alla WSL sono state condotte con il supporto di Dr. Felix Fundel e di Nans Addor.

MeteoSvizzera ha fornito gratuitamente per scopi di ricerca i dati delle proprie stazioni a terra e le previsioni deterministiche (modelli COSMOCH7 e COSMOCH2) e probabilistiche (COSMO-LEPS). Si ringrazia in particolare il Dr. Urs Germann e i suoi collaboratori per la messa a disposizione dei prodotti "Radar Ensemble REAL" e "NORA". L'Ufficio federale dell'Ambiente (UFAM) ed in particolare Edith Oosenbourg per la messa a disposizione dei dati idrologici.

Il Dipartimento delle finanze e dell'economia, divisione dell'economia del Cantone Ticino, per il finanziamento nell'ambito del programma transfrontaliero Interreg Italia-Svizzera 2007-2013 a parziale copertura dei costi sostenuti.

BIBLIOGRAFIA

Addor N, Jaun S, Zappa M. 2011. An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): skill, case studies and scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 2327-2347.

Berenguer M, Corral C, Sanchez-Diezma R, Sempere-Torres D. 2005. Hydrological validation of a radar-based nowcasting technique. *Journal of Hydrometeorology* 6: 532-549.

Borga M, Anagnostou EN, Blöschl G, Creutin JD. 2011. Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. *Environmental Science & Policy* 14: 834-844.

Chiang Y-M, Hsu K-L, Chang F-J, Hong Y, Sorooshian S. 2007. Merging multiple precipitation sources for flash flood forecasting. *Journal of Hydrology* 340: 183-196.

Cloke HL, Pappenberger F. 2009. Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology* 375: 613-626.
Collier CG. 2007. Flash flood forecasting: What are the limits of predictability? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 133: 3-23.

Diezig R, Fundel F, Jaun S, Vogt S. 2010. Verification of runoff forecasts by the FOEN and the WSL In *Advances in Flood Forecasting and the Implications for Risk Management*, CHR ed. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR): Alkmaar; 111-113.

Germann U, Berenguer M, Sempere-Torres D, Zappa M. 2009. REAL - Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 135: 445-456.

Germann U, Galli G, Boscacci M, Bolliger M. 2006. Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 132: 1669-1692.

Hapuarachchi HAP, Wang QJ, Pagano TC. 2011. A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological Processes* 25: 2771-2784.

- Hilker N, Hegg C, Zappa M. 2008: Unwetterschäden in der Schweiz 1972-2007 - Mit besonderer Betrachtung des August-Hochwassers 2005. In: Mikos M, Huebl J, Kobolt-sching G (Eds.): INTERPRAEVENT 2008 - Conference Proceedings, Vol. 1: 99-110.
- Jaun S, Ahrens B. 2009. Evaluation of a probabilistic hydrometeorological forecast system. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 6: 1843-1877.
- Krajewski WF, Smith JA. 2002. Radar hydrology: rainfall estimation. *Advances in Water Resources* 25: 1387-1394.
- Krajewski WF, Villarini G, Smith JA. 2010. RADAR-RAINFALL UNCERTAINTIES Where are We after Thirty Years of Effort? *Bulletin of the American Meteorological Society* 91: 87-94.
- Liechti K, Fundel F, Germann U, Zappa M. 2012a, Flood nowcasting in the Southern Swiss Alps using radar ensemble. In: *Weather Radar and Hydrology. Proceedings of a symposium held in Exeter, UK, April 2011* (IAHS Publ. 351, in press).
- Liechti K, Zappa M, Fundel F, Germann U. 2012b. Probabilistic evaluation of different schemes for ensemble discharge nowcasts in two nested flash-flood prone Alpine basins. Submitted to *Hydrological processes*. Pending with revisions (March 2012)
- Mandapaka PV, Germann U, Panziera L, Hering A. 2012: Can Lagrangian extrapolation of Radar Fields Be Used for Precipitation Nowcasting over Complex Alpine Orography?. *Wea. Forecasting*, 27, 28-49.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models (1), a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
- Panziera L, Germann U. 2010. The relation between airflow and orographic precipitation on the southern side of the Alps as revealed by weather radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 136: 222-238.
- Panziera L, Germann U, Gabella M, Mandapaka PV. 2011. NORA-Nowcasting of Orographic Rainfall by means of Analogues. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*: n/a-n/a
- Romang H, Zappa M, Hilker N, Gerber M, Dufour F, Frede V, Berod D, Oplatka M, Hegg C, Rhyner J. 2011. IFKIS-Hydro: an early warning and information system for floods and debris flows. *Natural Hazards* 56: 509-527.
- Rossa A, Bruen M, Fruehwald D, Macpherson B, Holleman I, Michelson D, Michaelides S. 2005. COST 717 Action - Use of Radar Observation in Hydrology and NWP Models. COST; 286.
- Rossa A, Liechti K, Zappa M, Bruen M, Germann U, Haase G, Keil C, Krahe P. 2011. The COST 731 Action: A review on uncertainty propagation in advanced hydro-meteorological forecast systems. *Atmospheric Research* 100: 150-167.
- Schaefli B, Gupta H. 2007. Do Nash values have value?, *Hydrol. Proc.*, 21, 2075-2080, doi: 10.1002/hyp.6825.
- Schiemann R, Erdin R, Willi M, Frei C, Berenguer M, Sempere-Torres D. 2011. Geostatistical radar-rain gauge combination with nonparametric correlograms: methodological considerations and application in Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 1515-1536.

Szturc J, Osrodka K, Jurczyk A, Jelonek L. 2008. Concept of dealing with uncertainty in radar-based data for hydrological purpose. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 267-279.

Villarini G, Krajewski WF, Ntelekos AA, Georgakakos KP, Smith JA. 2010. Towards probabilistic forecasting of flash floods: The combined effects of uncertainty in radar-rainfall and flash flood guidance. *Journal of Hydrology* 394: 275-284.

Viviroli D, Zappa M, Gurtz J, Weingartner R. 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software* 24: 1209-1222.

Werner M, Cranston M. 2009. Understanding the Value of Radar Rainfall Nowcasts in Flood Forecasting and Warning in Flashy Catchments. *Meteorological Applications* 16: 41-55.

Wilks DS. 2006. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Elsevier: Amsterdam; 627.

Wöhling T, Lennartz F, Zappa M. 2006. Technical Note: Updating procedure for flood forecasting with conceptual HBV-type models. *Hydrology and Earth System Sciences* 10: 783-788.

Zappa M, Beven KJ, Bruen M, Cofino A, Kok K, Martin E, Nurmi P, Orfila B, Roulin E, Schröter K, Seed A, Szturc J, Vehviläinen B, Germann U, Rossa A. 2010. Propagation of uncertainty from observing systems and NWP into hydrological models: COST-731 Working Group 2. *Atmospheric Science Letters* 11: 83-91.

Zappa M, Jaun S, Germann U, Walser A, Fundel F. 2011. Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmospheric Research* 100: 246-262.

Zappa M, Fundel F, Jaun S. 2012. A "Peak-Flow Box" for Supporting Interpretation and Evaluation of Operational Ensemble Flood Forecasts. Submitted to *Hydrological processes*. Pending with revisions (March 2012)

Zappa M, Rotach MW, Arpagaus M, Dorninger M, Hegg C, Montani A, Ranzi R, Ament F, Germann U, Grossi G, Jaun S, Rossa A, Vogt S, Walser A, Wehrhan J, Wunram C. 2008. MAP D-PHASE: real-time demonstration of hydrological ensemble prediction systems. *Atmospheric Science Letters* 9: 80-87.

Zappa M, Vogt S. 2007. Hochwasservorhersagesysteme der neusten Generation im Praxis-Test. *WSL Forum für Wissen*, 31.10.2007, Tagungsband.

4

Valutazione probabilistica delle portate al colmo di piena nel settore occidentale del bacino del Po



OBIETTIVI

La sicurezza del territorio nei confronti degli eventi di piena è ormai ritenuta un elemento imprescindibile della pianificazione territoriale; per tale motivo è necessario dotarsi di strumenti aggiornati per la valutazione probabilistica delle portate di piena.

La stessa Direttiva Europea sulle Alluvioni (2007/60/CE), recepita con D. Lgs. n. 49/2010, pone l'obiettivo di ridurre le conseguenze negative, attraverso le attività di valutazione e gestione dei rischi di alluvione e l'analisi idrologica di piena è il primo passo nel processo di mappatura della pericolosità idraulica.

Il presente lavoro si colloca in questo contesto proponendo una procedura di regionalizzazione delle informazioni di piena, cioè una metodologia che permette di trasferire le informazioni presenti nelle sezioni strumentate a tutti i punti del reticolo idrografico. Lo scopo è costruire la curva di frequenza delle piene, ovvero una funzione che permetta di stimare su tutto il territorio piemontese la portata di progetto in funzione del periodo di ritorno. Nello specifico, si sono identificate le seguenti categorie di intervento:

- aggiornamento del quadro conoscitivo relativo all'osservazione dei fenomeni alluvionali;
- applicazione ed estensione di procedure statistiche esistenti per la valutazione del rischio alluvionale;
- sviluppo di metodi statistici per il miglioramento della stima delle portate di progetto;
- incremento della robustezza dei metodi di stima tramite uso congiunto di stimatori statistici distinti e metodi per la valutazione dell'incertezza statistica.

Le attività connesse al raggiungimento degli obiettivi sopra elencati sono descritte in dettaglio nel seguito.

1. DEFINIZIONE DELLE BASI DI DATI

1.1 Base dati idrologica

Il primo passo per la costruzione e validazione di modelli per la valutazione del rischio alluvionale è la predisposizione di una base dati affidabile, adeguatamente estesa nel tempo e nello spazio e quanto più possibile aggiornata. Il progetto ha consentito di mettere a punto un lavoro di sistemazione dei dati idrologici di cui si sentiva da tempo la necessità. Infatti, il reperimento di dati ufficiali di piena (in particolare i valori di portata al colmo di piena) prima del presente lavoro richiedeva di riferirsi alla Pubblicazione n. 17 del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) che rappresentava l'unico esempio di catalogo sistematico delle piene in Italia. L'ultima edizione della Pubblicazione n. 17 risale al 1970.

La predisposizione della base di dati idrologica è quindi coincisa con l'aggiornamento del catalogo delle piene a livello di macro regione. E' stato quindi predisposto uno specifico catalogo, contenente sia i dati storici che quelli derivanti dalla disponibilità di una notevole mole di nuove informazioni. Da un lato, tali informazioni sono il frutto di un lavoro sistematico ed esteso di rivalutazione di altezze idrometriche già rilevate dal SIMN, ma mai convertite in valori di portata; dall'altro, derivano dalla raccolta dati effettuata presso stazioni idrometriche della rete regionale integrata con altre fonti. Il catalogo delle piene consiste sostanzialmente in una raccolta di schede-stazione, delle quali la Figura 4.1 riporta un esempio: ogni scheda-stazione contiene una monografia della stazione ed una tabella con le portate osservate. Eventuali note aggiungono informazioni specifiche relative ai singoli anni.

Stura di Lanzo a Lanzo



Coord.Geografiche (WGS84)	Lon. 7° 28' 58.13" Lat. 45° 16' 6"	Bacino Principale	Stura di Lanzo
Coord. Cartografiche UTM 32N (WGS84) [m]	E 380982 N 5013879	Quota dello zero idrometrico [m s.l.m.]	446.86 (SIMN); 452.2 (Arpa)
Area bacino [km ²]	578,3	Data inizio osservazioni	1927 (I) e 1930 (In, con lacune dal 1944 a tutto il 1945.
Aree lacuali [%]	0,18	Data inizio misure	11/1929
Lunghezza asta principale [km]	41,1	Data disattivazione	Attiva
Aree a quota > 2500 m [%]	16,6	Min. altezza idrometrica [m]	-0,14 (19/12/2009)
Aree a quota > 2000 m [%]	38,2	Max. altezza idrometrica [m]	4.37* (15/10/2000)
Aree a quota > 1500 m [%]	62,1	Portata minima [m ³ /sec]	2,418 (24/01/2006)
Aree a quota > 1000 m [%]	85,8	Portata massima [m ³ /sec]	1600** (1947)
Quota massima bacino [m s.l.m.]	3618,0	Area sottobacini sottesi da invasi artificiali [%]	5,1
Quota media bacino [m s.l.m.]	1780,0	Capacità utile invasi artificiali [10 ⁶ m ³]	9,9

Osservazioni: Ex stazione SIMN attualmente gestita da Arpa Piemonte. La stazione attuale coincide con la storica.

Osservazioni Arpa dal 12/07/1990.

* Dato riferito al periodo di monitoraggio Arpa. Durante la gestione SIMN: max. altezza idrometrica 4.2 m. **

Durante il periodo di monitoraggio Arpa: portata massima 1200 m³/s il 15/10/2000.

Figura 4.1: Esempio di scheda stazione: sulla prima pagina si ritrova la scheda relativa alla stazione di misura, mentre sulla seconda sono riportati i dati di portata corredati da eventuali note.

Stura di Lanzo a Lanzo

Anno	Q _{colmo} [m ³ /s]	Q _{giorn} [m ³ /s]	Anno	Q _{colmo} [m ³ /s]	Q _{giorn} [m ³ /s]	Anno	Q _{colmo} [m ³ /s]	Q _{giorn} [m ³ /s]
1921	-	-	1951	560.0	239.0	1981	570.1 ⁽¹⁾	441.0
2	-	-	2	147.0	120.0	2	-	-
3	-	-	3	554.0	300.0	3	-	-
4	-	-	4	185.0	113.0	4	-	-
1925	-	-	1955	190.0	81.0	1985	-	-
6	-	-	6	568.0	304.0	6	-	-
7	-	-	7	870.0 ⁽⁶⁾	491.0	7	-	-
8	-	-	8	183.0	108.0	8	-	-
9	628.0 ⁽⁵⁾	-	9	320.0	129.0	9	-	-
1930	618.0	288.0	1960	515.0	285.0	1990	-	-
1	201.0	152.0	1	410.0	160.0	1	-	-
2	647.0	304.0	2	1370.0	586.0	2	-	-
3	772.0	372.0	3	286.0	124.0	3	1200	-
4	450.0	202.1	4	490.0	376.0	4	830	-
1935	209.7	88.5	1965	570.0	208.0	1995	-	-
6	179.0	121.0 ⁽⁴⁾	6	432.0	290.0	6	-	-
7	341.0	196.5	7	286.0	68.4	7	310	-
8	370.0	170.4	8	510.0 ⁽³⁾	325.0	8	210	-
9	111.0	83.3	9	350.0	235.0	9	530	-
1940	522.0	291.0	1970	350.0	196.0	2000	1200 ⁽²⁾	-
1	325.0	192.2	1	360 ⁽¹⁾	128.0	1	360	-
2	366.0	176.0	2	446 ⁽¹⁾	194.0	2	380	248.1
3	229.0	57.2	3	549 ⁽¹⁾	221.0	3	160	88.3
4	-	-	4	166 ⁽¹⁾	102.0	4	220	126.7
1945	-	-	1975	-	114.0	2005	560	225.4
6	350.0	140.0	6	574.4 ⁽¹⁾	321.0	6	1045	475.4
7	1600.0 ⁽⁶⁾	696.0	7	968.9 ⁽¹⁾	467.0	7	255	85.2
8	220.0	220.0	8	-	146.0	8	620	402.9
9	696.0	357.0	9	-	170.0	9	240	111.7
1950	120.0	56.0	1980	160.5 ⁽¹⁾	69.7	2010	815	474.5

Note : ⁽¹⁾ Valore ricostruito mediante scala di deflusso di piena.

⁽²⁾ Sostituisce il dato precedentemente pubblicato nei Rapporti d'Evento di Arpa Piemonte

⁽³⁾ Dato Sezione F del 1968.

⁽⁴⁾ Sull'Annale è riportato un valore di portata massima giornaliera pari a 124.1 m³/s.

⁽⁵⁾ Record breaking Annale del 1930.

⁽⁶⁾ Dato Sezione F.

La procedura di revisione dei dati SIMN non pubblicati è stata motivata dalla presenza, in molte sezioni del territorio piemontese, di misure di altezza idrometrica (massimi al colmo) raccolte sia prima che dopo il 1970 dalla Sezione di Torino dell'Ufficio Idrografico del Po del SIMN. Tali altezze idrometriche non erano state convertite in altrettanti valori di portata per mancanza delle necessarie scale di deflusso annuali. Claps et al. (2003) avevano tuttavia mostrato che, in condizioni di piena, a causa della scarsa variabilità delle scale annue nel campo delle portate elevate, può essere lecito utilizzare una scala delle portate unica, valida cioè per più anni e come tale definita scala di deflusso di piena. Per la ricostruzione dei nuovi valori di portate massime annue al colmo da inserire nel catalogo è stato utilizzato un "protocollo", proposto da Claps et al. (2010), ottenuto estendendo e sistematizzando la procedura di Claps et al. (2003). L'applicazione del metodo, discussa in dettaglio da Claps et al. (2011), ha portato alla ricostruzione di circa 120 valori di portata distribuiti su 30 stazioni, a fronte di un totale di circa 800 dati disponibili in precedenza.

I dati ricostruiti, assieme alle serie storiche SIMN, sono infine integrati con le misure effettuate negli anni recenti dalla rete idrometrica regionale gestita da Arpa Piemonte, per 17 stazioni. Per alcune di queste la sezione di misura ARPA coincide esattamente con quella precedentemente gestita dal SIMN; per le sezioni non coincidenti si è valutata la prossimità a quelle storiche, ritenendole comunque equivalenti ai fini dell'omogeneità delle serie storiche di dati di piena, a causa della modesta differenza in termini di bacino idrografico sotteso.

A queste stazioni che estendono le serie storiche SIMN si aggiungono 32 nuove stazioni automatiche della rete idrometrica regionale, 14 stazioni gestite da ENEL e 3 stazioni gestite dal CNR. Il catalogo si completa, infine, con le portate ricostruite mediante l'applicazione dell'equazione di bilancio dei serbatoi a 28 invasi. La posizione geografica delle stazioni considerate è riportata nella Figura 4.2.

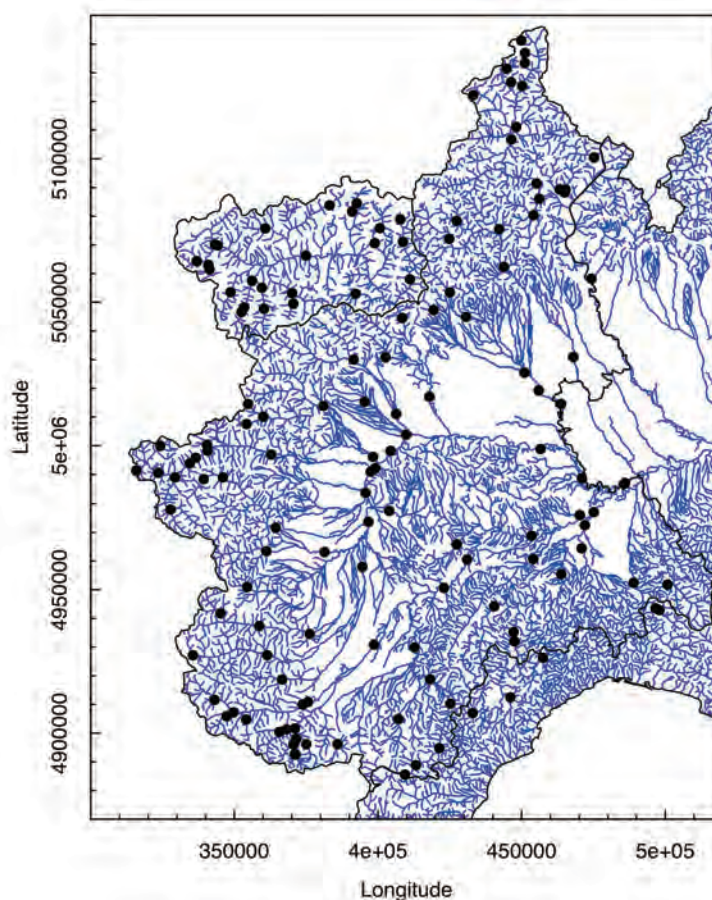


Figura 4.2: Distribuzione geografica delle stazioni di misura disponibili.

Per le successive analisi si sono pertanto raccolti dati sulle portate di piena per un totale di 140 bacini, ognuno dei quali con almeno 5 anni di misure. La tipologia di dato è variabile da sezione a sezione e comprende valori di portata al colmo, massimi orari, giornalieri, o su finestre di 24 ore consecutive. Una sintesi delle disponibilità di dati negli anni coperti dal catalogo delle piene è riportata nella Figura 4.3 per i valori al colmo e per i massimi giornalieri.

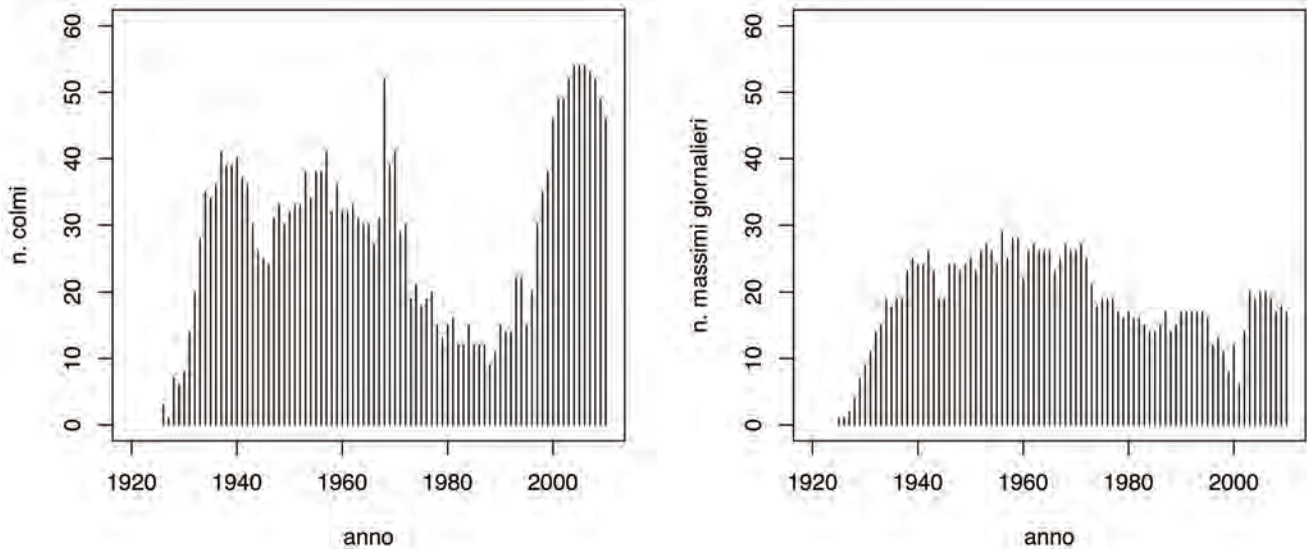


Figura 4.3: Numerosità delle serie storiche disponibili (colmi ed estremi giornalieri). Alcune stazioni dispongono anche di valori massimi orari e valori massimi sulle 24 ore (non riportati in figura).

1.2 Descrittori di bacino

Il trasferimento delle informazioni relative alle portate di piena in siti non strumentati, attraverso tecniche di regionalizzazione dei dati idrologici, passa per l'utilizzo di caratteristiche di bacino, dette comunemente descrittori. I descrittori di bacino sono stati determinati in questo studio attraverso procedure basate sui software open-source GRASS GIS e R, in modo da renderne ripetibile la loro determinazione.

Una prima tipologia di descrittori considerati comprende le caratteristiche geomorfologiche del bacino e del reticolo idrografico, come ad esempio la lunghezza dell'asta principale, la pendenza media dei versanti, la densità di drenaggio, ecc. Le analisi sono state condotte utilizzando il modello digitale del terreno (DEM) della missione SRTM della NASA del 2000 (Farr et al., 2007). Tali procedure forniscono anche la delimitazione del bacino data una qualsiasi sezione di chiusura posta sul reticolo idrografico.

Ogni delimitazione di bacino può essere successivamente utilizzata per "ritagliare" varie cartografie tematiche contenenti informazioni di tipo climatico, pedologico, di vegetazione, ecc. al fine di poter ricavare il valore medio a scala di bacino del descrittore oppure il suo coefficiente di variazione spaziale (sempre a scala di bacino). Tra i descrittori utilizzati ricordiamo le statistiche di precipitazione media ed estrema recentemente analizzate da Bartolini et al. (2011), oltre che parametri di uso del suolo, permeabilità, vegetazione. Complessivamente sono stati considerati 121 descrittori di bacino.

Un esempio di come si distribuisca il valore medio a scala di bacino della pioggia media annua è riportato nella Figura 4.4 per i bacini considerati.

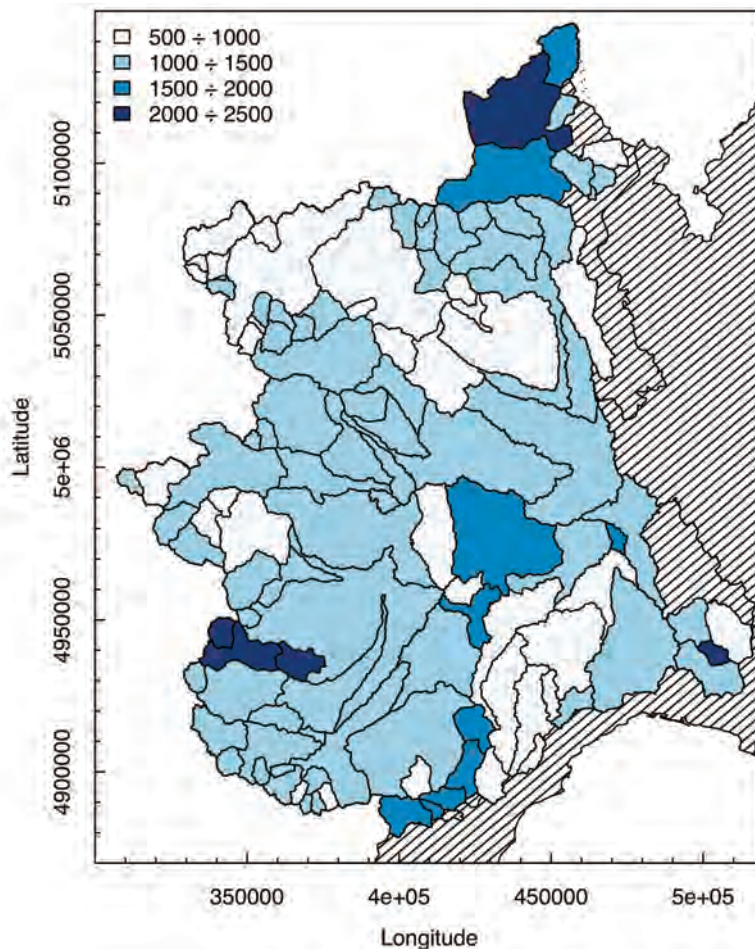


Figura 4.4: Esempio di mappa rappresentante la precipitazione media annua a scala di bacino per i bacini utilizzati nell'analisi. I valori sono espressi in millimetri. Per bacini innestati, la colorazione relativa al bacino più piccolo si sovrappone a quella del bacino idrografico principale.

2. STIMA DELLE PORTATE DI PROGETTO

2.1 Metodologia di regionalizzazione

La previsione delle portate per assegnato periodo di ritorno nei bacini non strumentati è stata effettuata mediante una tecnica di regionalizzazione recentemente proposta da Laio et al. (2011), che introduce alcune novità concettuali rispetto alle procedure precedenti. La procedura di regionalizzazione riprende la formulazione del classico metodo della piena indice (Dalrymple, 1960),

$$Q_T = Q_{ind} \cdot K_T \quad (1)$$

in cui la portata di progetto Q_T è rappresentata come prodotto di un fattore di scala (la piena indice, Q_{ind}), determinato a scala locale, e di un fattore di crescita K_T determinato a scala regionale e funzione del periodo di ritorno. La piena indice utilizzata nella procedura è rappresentata dal valore medio dei massimi annui al colmo di piena. La piena indice può essere facilmente determinata nei siti strumentati e stimata in ogni bacino non strumentato attraverso modelli regressivi che saranno presentati nel seguito. La determinazione della curva di crescita, ovvero della curva di frequenza resa adimensionale rispetto alla media, presenta invece i maggiori elementi di novità che rendono il modello proposto una generalizzazione dell'equazione (1). In particolare, non si ricorre alla divisione del dominio di interesse in regioni omogenee e la scelta della distribuzione di probabilità per descrivere la curva di crescita viene effettuata solo in fase di calcolo del quantile in funzione del periodo di ritorno e non preliminarmente alle analisi come nei metodi standard. Queste novità sono particolarmente rilevanti

perché evitano le difficoltà che si incontrano in prossimità del confine tra regioni (dove con un piccolo spostamento si ricade in regioni diverse), e nei casi in cui le caratteristiche statistiche della distribuzione si dimostrino poco stabili all'interno delle stessa regione. L'assenza di regioni omogenee permette alle caratteristiche statistiche delle piene di poter variare con continuità da sito a sito, e facilita la valutazione delle incertezze di stima. Nel presente approccio, inoltre, non è necessario prevedere a priori una specifica distribuzione di probabilità: la scelta verrà effettuata solo in fase di determinazione del quantile di interesse.

Non avendo a disposizione una distribuzione di probabilità, non è però possibile regionalizzare né i quantili, né i parametri della distribuzione stessa. In questo studio si considera quindi la regionalizzazione di grandezze *distribution-free*, nel caso specifico i rapporti adimensionali L_{CV} e L_{CA} che sono rispettivamente indicatori di dispersione e asimmetria della distribuzione, analogamente al coefficiente di variazione e di asimmetria, ma basati sulla teoria degli L-momenti (Hosking e Wallis, 1997). La regionalizzazione di L_{CV} ed L_{CA} permette comunque la ricostruzione della curva di crescita K_T , utilizzando successivamente le relazioni tra parametri ed L-momenti disponibili per molte distribuzioni di probabilità. L'equazione (1) diventa:

$$Q_T - Q_{ind} \cdot F(L_{CV} \cdot L_{CA} \cdot T) \quad (2)$$

dove T è il periodo di ritorno, F una generica distribuzione, e Q_{ind} , L_{CV} , L_{CA} sono tutti elementi variabili da sito a sito. L'uso di Q_{ind} , L_{CV} ed L_{CA} invece dei quantili o dei parametri di una distribuzione è utile sia durante la calibrazione che in fase di applicazione del modello, laddove sono presenti campioni poco numerosi, come nel caso del territorio piemontese e, in generale, italiano. Una giustificazione intuitiva di questo fatto si può osservare, ad esempio, nella Figura 4.5, che rappresenta un campione di 16 elementi.

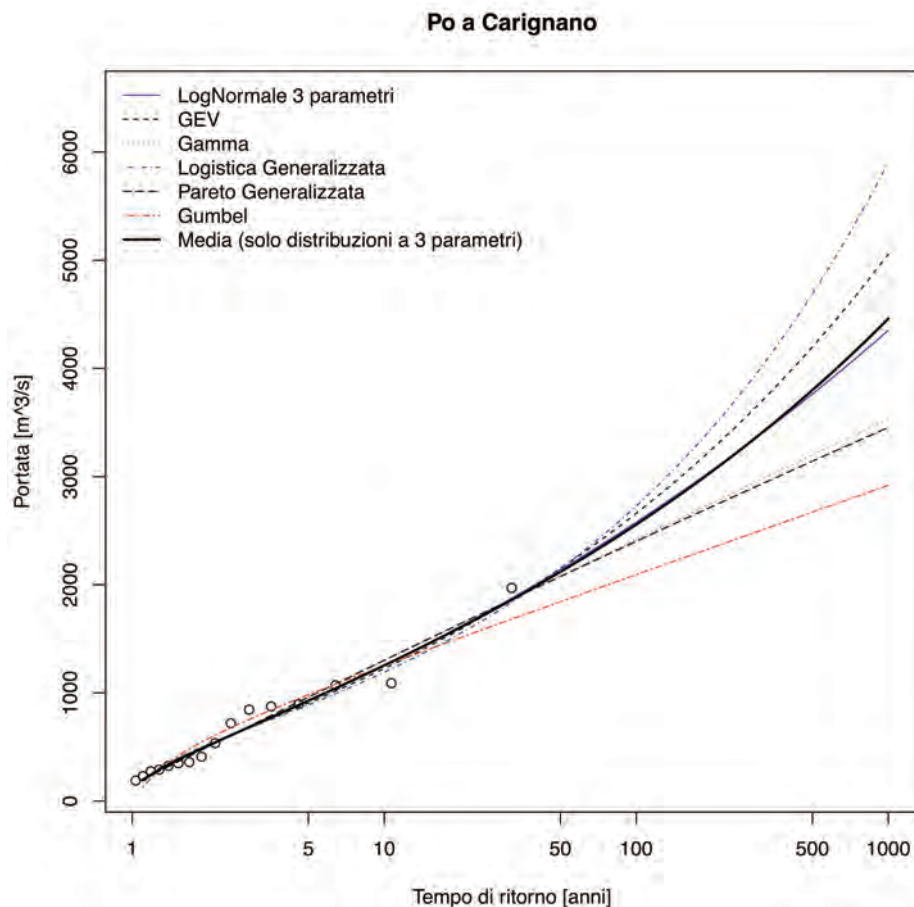


Figura 4.5: Per campioni con pochi dati, diverse distribuzioni ben rappresentano i dati, ma divergono significativamente per tempi di ritorno di interesse ingegneristico.

In questo caso, diverse distribuzioni sono in grado di rappresentare adeguatamente il campione solo per tempi di ritorno coperti dai dati, mentre portano a divergenze significative per tempi di ritorno più elevati e di maggiore interesse ingegneristico. Scegliere a priori una distribuzione in casi come questo porterebbe a distorcere in maniera incontrollata gli stimatori delle portate di progetto. D'altro canto, in fase di previsione in un sito caratterizzato da una serie storica breve, è possibile comunque sfruttare l'informazione locale presente: per esempio è possibile calcolare Q_{ind} e L_{CV} basandosi sui dati campionari e lasciare alla procedura regionale la valutazione di L_{CA} . Da questo punto di vista, questo approccio generalizza il metodo originale della piena indice, nel quale molto spesso Q_{ind} è stimato localmente sulla base di poche misure, mentre la curva di crescita è derivata attraverso procedure regionali.

2.2 Calibrazione dei modelli regressivi

Una volta individuate le variabili in gioco, è necessario definire la funzione per trasferire le informazioni verso i bacini non strumentati. Come descritto in precedenza, le variabili da regionalizzare sono tre; il modello regionale è quindi un set di relazioni che permettono di valutare Q_{ind} , L_{CV} ed L_{CA} . Queste relazioni sono definite per mezzo di regressioni lineari su tutto il dominio di interesse, senza ricorrere alla delimitazione di sottoregioni e, quindi, senza ricorrere a test di omogeneità.

Ogni singola regressione si basa sull'approccio proposto da Stedinger e Tasker (1985) e adattato per questo modello regionale da Laio et al. (2011). Sia Y_T il valore vero e incognito della statistica di interesse, cioè Q_{ind} , L_{CV} , L_{CA} o qualunque funzione di queste variabili, si può definire la relazione lineare:

$$Y_T = X\beta + \delta \quad (3)$$

dove la matrice X di dimensione $N \times p$ contiene p descrittori relativi a N bacini, β è il vettore dei coefficienti di regressione e δ è il vettore che contiene i residui dovuti alle approssimazioni insite nel modello. Il termine δ è detto anche errore modello.

In pratica però, il vero valore della statistica Y_T non è noto, ma deve essere sostituito dal corrispondente stimatore campionario Y , che è affetto da errore campionario η . Si ha quindi:

$$Y = Y_T + \eta \quad (4)$$

Combinando le equazioni (3) e (4) il modello regressivo diventa

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (5)$$

con $\varepsilon = \delta + \eta$

Il modo più semplice per determinare i coefficiente β della regressione è attraverso il metodo dei minimi quadrati ordinari (OLS). Tale procedura è tuttavia inadatta nelle applicazioni idrologiche a causa della presenza di serie storiche brevi e potenzialmente correlate (es. Stedinger e Tasker, 1985), che porta alla violazione delle ipotesi di omoschedasticità ed indipendenza dei residui della regressione. Per superare queste problematiche sono stati sviluppati i metodi dei minimi quadrati pesati (WLS) o generalizzati (GLS) che richiedono le varianze e covarianze del vettore Y . La soluzione del problema ai minimi quadrati (OLS, WLS o GLS), quando non si considera il termine dovuto all'errore modello, è facilmente ottenibile (es. Montgomery et al., 2001).

Quando la metodologia dei minimi quadrati viene associata con un modello come quello dell'equazione (5), dove è necessario tenere conto anche dell'errore modello, è necessaria una procedura più complessa (Stedinger e Tasker, 1985; Griffis e Stedinger, 2007) che richiede soluzioni iterative. Tale procedura permette di ottenere, oltre alla stima dei coefficienti del vettore β , anche una stima della varianza modello σ_δ , cioè quella quota parte della varianza di stima dovuta al fatto che il modello è una semplificazione di una serie di processi naturali molto

più complessi. La definizione di un modello regressivo adeguato per ogni variabile Y dipende anche dalla scelta dei descrittori X utilizzati nell'equazione (5). La scelta del set di descrittori più appropriato non è ovvia, anche in virtù del fatto che sono disponibili molti descrittori. Per risolvere il problema utilizzando le regressioni secondo Stedinger e Tasker (1985), sono stati analizzati tutti i possibili modelli che contengono da uno a quattro descrittori, considerando più di due milioni di combinazioni per ogni variabile analizzata. I modelli ottenuti sono stati successivamente ordinati secondo la loro varianza modello σ_δ e sottoposti ai test statistici necessari.

I modelli con prestazioni migliori hanno varianza modello più bassa. Visto il gran numero di modelli analizzati, è frequente ottenere diverse combinazioni di descrittori che producono risultati simili. Per selezionare quindi il modello finale, si ricorre ad una analisi di dettaglio dei primi modelli classificati, valutando ulteriori statistiche di qualità come la varianza media delle stime, l'errore quadratico medio (RMSE), l'errore assoluto medio (MAE), ecc. Per una valutazione più corretta di tali indicatori, viene utilizzata la procedura di cross-validazione: ogni bacino, a turno, viene rimosso dalla base dati; il modello viene quindi ricalibrato sui bacini rimasti e utilizzato per effettuare la stima nel bacino rimosso. Questo consente di ottenere una previsione in ogni bacino senza che esso sia stato utilizzato per calibrare il modello, consentendo quindi una stima indistorta dei residui.

La procedura finora descritta è di carattere generale e può essere applicata ad ogni tipo di variabile. Si fa notare che, molto frequentemente nel caso della piena indice, ma anche nel caso di L_{CV} , risulta appropriato applicare, anziché il modello additivo di equazione (5), la forma moltiplicativa del tipo:

$$Q_{ind} = \beta_0 \cdot x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \dots x_p^{\beta_p} \cdot \varepsilon \quad (6)$$

La forma moltiplicativa può essere ricondotta al modello lineare applicando una trasformazione logaritmica sia alla variabile dipendente Q_{ind} o L_{CV} che ai singoli descrittori.

Per ogni variabile regionalizzata è anche possibile ottenere una valutazione della relativa incertezza mediante il calcolo della varianza di stima, che risulta essere funzione della varianza modello σ_δ .

2.3 Portata di progetto e incertezza di stima

L'obiettivo finale della procedura regionale è la stima del quantile di piena e della associata incertezza per un dato periodo di ritorno in un sito qualunque, strumentato o non strumentato. È necessario a questo punto scegliere una distribuzione di probabilità; tuttavia, come già osservato, per tempi di ritorno bassi ci sono più distribuzioni che ben rappresentano i dati; mentre per tempi di ritorno elevati la scelta non è ovvia, come già mostrato in figura 4.5 (vedere anche Laio et al., 2009). Una soluzione ragionevole al problema, quando non ci sia un'indicazione a priori sulla distribuzione da utilizzare, è quella di definire il quantile di interesse utilizzando una procedura di *model-averaging*. L'approccio *model-averaging* si basa sull'idea che più di una distribuzione sia adeguata per la stima del quantile. Invece di scegliere una sola distribuzione (tra quelle che si adattano bene in fase di calibrazione), è preferibile valutarne diverse e calcolarne il valore medio. Le diverse distribuzioni condividono gli stessi L-momenti Q_{ind} , L_{CV} e L_{CA} ma ovviamente il quantile si differenzia in base alla forma funzionale. Ai fini pratici, può tuttavia risultare computazionalmente dispendioso valutare diverse distribuzioni per diversi tempi di ritorno e calcolarne infine la media. Si è tuttavia osservato che, nel territorio piemontese, la curva di frequenza ottenuta mediante *model-averaging* risulta sempre molto prossima alla curva basata sulla distribuzione log-Normale a tre parametri. Si suggerisce quindi, almeno per valutazioni preliminari, di utilizzare la log-Normale a tre parametri come distribuzione di riferimento.

Ultimo elemento, ma non meno importante, è la già citata valutazione delle incertezze delle stime effettuate con il metodo regionale. Queste valutazioni sono particolarmente importanti, anche se spesso trascurate, perché permettono di valutare l'affidabilità delle stime ottenute. La stima dell'incertezza può essere facilmente implementata nel presente studio (es. Laio et al., 2011) valutando l'incertezza di stima delle singole variabili regionalizzate: piena indice, L_{CV} e L_{CA} . Mediante simulazioni Monte Carlo che simulano la variabilità dei tre parametri, viene costruito un gran numero di curve di frequenza. L'analisi della dispersione di questo fascio di curve intorno al valore regionale per un prefissato periodo di ritorno, indica l'incertezza della stima regionale stessa.

3. RISULTATI

L'analisi dei modelli regressivi ha evidenziato la presenza di diverse relazioni con prestazioni molto simili tra di loro. Di conseguenza, oltre al modello classificato come migliore, è possibile selezionare anche modelli alternativi che abbinino alle buone prestazioni anche la presenza di descrittori di facile utilizzo.

Per la stima della piena indice si è osservato che la tipologia di modelli più affidabile è quella in forma moltiplicativa. Si suggerisce quindi la relazione:

$$Q_{ind} = 0,01099 \cdot area^{0.79291} \cdot IDF_a^{2.23345} \cdot IDF_n^{1.91592} \cdot c_f^{0.40866} \quad (7)$$

dove $area$ è l'area del bacino, IDF_a e IDF_n sono i parametri della curva di possibilità pluviometrica media nella forma $h = a \cdot d^n$ e c_f è il parametro di permeabilità. Alternativamente, è possibile utilizzare un ulteriore modello nel quale il descrittore c_f viene sostituito dal L_{CV} delle piogge intense con durata di un'ora ($L_{CV_{1h}}$):

$$Q_{ind} = 0,01324 \cdot area^{0.7995} \cdot IDF_a^{2.82089} \cdot IDF_n^{2.06805} \cdot LCV_{1h}^{1.33232} \quad (8)$$

Per la valutazione di L_{CV} regionale sono state investigate sia la forma moltiplicativa che quella additiva. Per il caso studio si suggerisce un modello in forma moltiplicativa

$$L_{CV} = 0,17719 \cdot H_{\min}^{0,20969} \cdot NDVI^{0,71067} \cdot CV[IDF_a]^{0,21581} \cdot CV[LCV_{6h}]^{(-0,19252)} \quad (9)$$

affiancato da un modello additivo alternativo

$$L_{CV} = 0,52485 - 9,7881 \cdot 10^{-5} \cdot H_{\min} - 1,39978 \cdot CV[LCV_{6h}] - 0,78171 \cdot LCA_{6h} + 0,23892 \cdot c_f \quad (10)$$

Le variabili in gioco per il calcolo del L_{CV} sono la quota minima del bacino H_{\min} , il valore dell'indice di vegetazione NDVI medio annuo ($NDVI$), il L_{CV} delle piogge intense con durata di 6 ore (LCV_{6h}) e i già citati IDF_a e c_f . Si noti che, per le variabili che presentano il simbolo $CV[]$, è necessario considerare il coefficiente di variazione del descrittore a scala di bacino, anziché il valore medio. Esso è facilmente determinabile in ambiente GIS, dividendo la deviazione standard ottenuta considerando i valori delle celle contenute nel bacino per la corrispondente media.

Infine, la valutazione regionale di L_{CA} delle portate al colmo di piena può essere effettuata con la relazione:

$$L_{CA} = 0,79468 - 2,14568 \cdot LCA_{6h} - 0,87195 \cdot CV[LCA_{24h}] + 0,00192 \cdot clc_2 + 0,01555 \cdot fourier_{B2} \quad (11)$$

nella quale subentrano anche il L_{CA} delle piogge intense a 24 ore, il parametro clc_2 basato sulle mappe di uso del suolo del progetto *CORINE Land Cover*, e un parametro indicativo dei regimi pluviometrici medi, $fourier_{B2}$.

Una volta determinati Q_{ind} , L_{CV} e L_{CA} è possibile stimare la portata di progetto per un associato periodo di ritorno attraverso l'utilizzo della distribuzione log-Normale a tre parametri. Le corrispondenti relazioni, derivate da Hosking e Wallis (1997), sono riportate nel rapporto conclusivo del progetto.

A titolo di esempio, si riporta nella Figura 4.6 la mappatura a scala di bacino del fattore di crescita K_T (curva di frequenza adimensionalizzata rispetto la piena indice) per un periodo di ritorno $T = 100$. Il risultato è stato ottenuto considerando l'equazione (9) per la stima di L_{CV} e l'equazione (11) per la stima di L_{CA} .

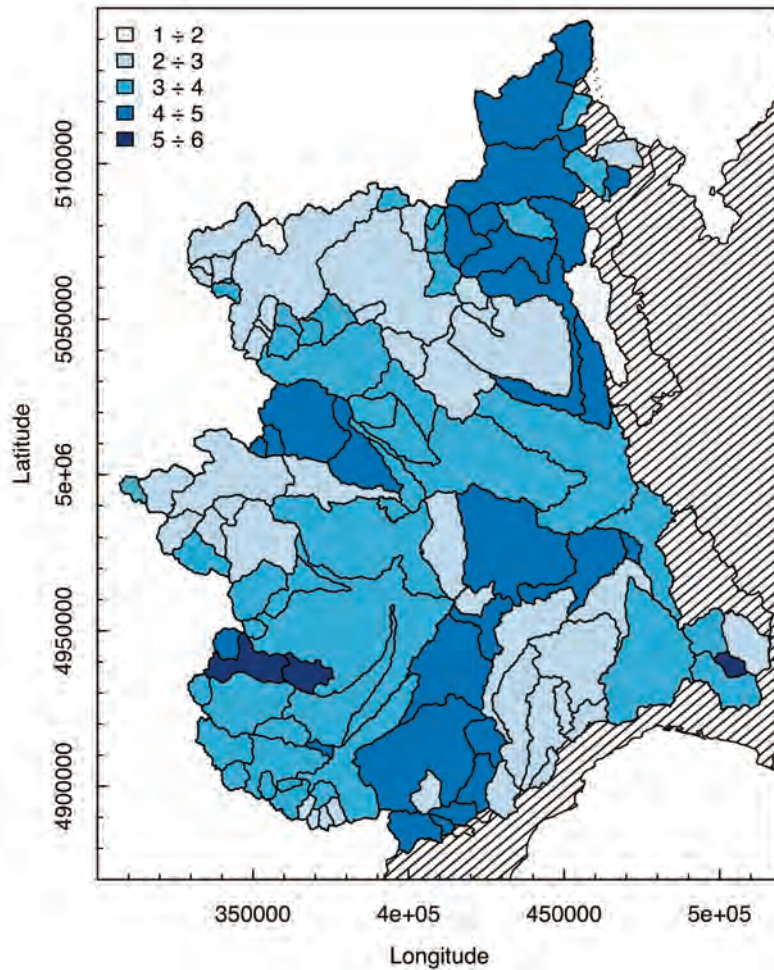


Figura 4.6: Mappa a scala di bacino del fattore di crescita K_T calcolato per periodo di ritorno $T=100$ considerando la distribuzione log-Normale a 3 parametri con L_{CV} ottenuto dall'equazione (9) e L_{CA} dall'equazione (11).

Dopo la valutazione della curva di frequenza, anche l'incertezza dei quantili deve essere stimata. Dal momento che le varianze di stima degli L-momenti regionali possono essere facilmente calcolate, è possibile utilizzare simulazioni Monte Carlo per propagare l'incertezza degli L-momenti alla distribuzione, definendo quindi le fasce di confidenza dei quantili. Un esempio di fasce di confidenza è riportato nella Figura 4.7 dove, nel grafico di sinistra si osservano le fasce di confidenza ottenute effettuando una stima degli L-momenti locale sul campione disponibile, mentre nella figura di destra si ha il caso in cui gli L-momenti provengono da stima regionale.

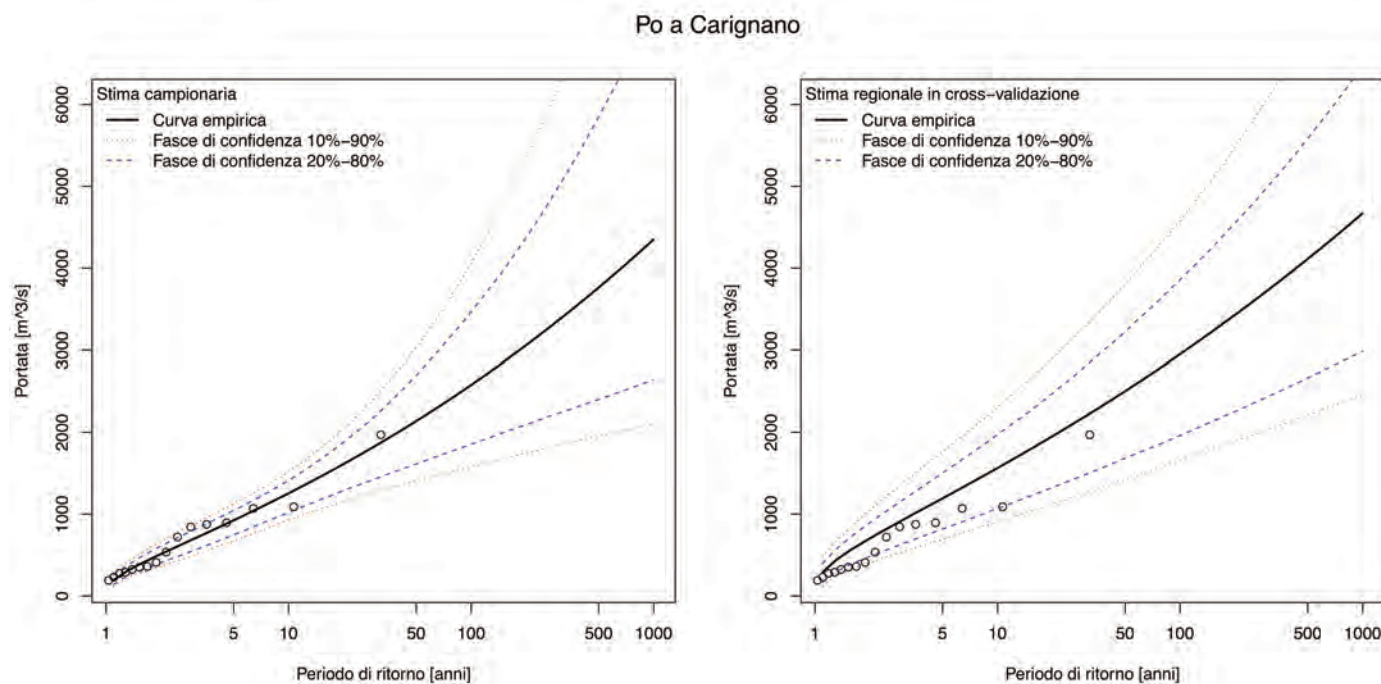


Figura 4.7: Fasce di confidenza relative alla curva di frequenza calcolata sulla base degli L-momenti campionari (a sinistra) e sui corrispettivi L-momenti regionali (a destra).

CONCLUSIONI

La procedura di valutazione probabilistica a scala regionale delle portate di piena permette di stimare il colmo di piena per assegnato periodo di ritorno valutando separatamente la piena indice Q_{ind} (valore medio dei colmi di piena) e gli indici di dispersione e asimmetria della distribuzione, L_{CV} e L_{CA} utilizzando la teoria degli L-momenti. Queste informazioni vengono combinate in un'unica distribuzione di probabilità che permette la valutazione del quantile di interesse della portata al picco.

La procedura richiede l'utilizzo di informazioni di carattere geomorfologico, pluviometrico, pedologico, ecc. a scala di bacino, che possono essere ottenute mediante procedure GIS sulla base di cartografie dedicate.

L'informatizzazione delle procedure consente di estendere la valutazione regionalizzata delle piene virtualmente a tutto il reticolo idrografico di interesse. Particolarmente interessante è l'applicazione del metodo in stazioni con pochi anni di misura, condizione piuttosto frequente anche allo stato attuale. In tal caso non è normalmente possibile valutare in maniera robusta la curva di frequenza basandosi esclusivamente sui dati campionari.

È tuttavia possibile calcolare le varianze campionarie di Q_{ind} , L_{CV} e L_{CA} e confrontarle con quella dei loro omologhi valutati con le procedure regionali. A questo punto è sufficiente scegliere quale metodologia è più appropriata (campionaria o regionale a seconda della varianza) per stimare ogni parametro Q_{ind} , L_{CV} e L_{CA} e proseguire con la valutazione della curva di frequenza. Questo consente di sfruttare sia l'informazione locale contenuta nei pochi anni di dati, sia l'informazione regionale che rende più robusta la costruzione della curva di frequenza.

RINGRAZIAMENTI

Un lavoro durato oltre tre anni ampio ed impegnativo che ha coinvolto diversi attori a vario titolo. Un ringraziamento particolare ai soggetti che hanno fornito i dati necessari per la costituzione del catalogo delle piene come i gestori degli invasi, primo fra tutti l'ENEL, il CNR ISEE, la Regione Valle d'Aosta, la Regione Liguria ed il Canton Ticino. Fondamentale per il conseguimento degli obiettivi è stata l'azione di sinergia con il progetto RISKMAT sviluppato nell'ambito della cooperazione Interreg Alcotra.

BIBLIOGRAFIA

- P. Claps, M. Fiorentino, e F. Laio (2003). Scale di deflusso di piena di corsi d'acqua naturali. In *Atti delle Giornate di Studio su La difesa idraulica del territorio*, Trieste, Settembre 2003.
- P. Claps, D. Ganora, F. Laio, e R. Radice (2010). Riesame ed integrazione di serie di portate al colmo mediante scale di deflusso di piena. In *XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*.
- T. Dalrymple (1960). *Flood frequency analyses*, volume 1543-A of Water Supply Paper. U.S. Geological Survey, Reston, Va.
- D. Ganora (2010). *Runoff estimation in data-scarce and ungauged basins with systematic use of morpho-climatic information*. Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino, Marzo 2010.
- V.W. Griffis e J.R. Stedinger (2007). *The use of GLS regression in regional hydrologic analyses*. Journal Of Hydrology, 344(1-2):82. ISSN 0022-1694. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.023.
- J.R.M. Hosking e J.R. Wallis (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press.
- F. Laio, D. Ganora, P. Claps, e G. Galeati (2011). *Spatially smooth regional estimation of the flood frequency curve (with uncertainty)*. Journal of Hydrology, 408:67-77. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.07.022.
- F. Laio, G. Di Baldassarre, e A. Montanari (2009). *Model selection techniques for the frequency analysis of hydrological extremes*. Water Resources Research, 45, JUL 18 2009. ISSN 0043-1397. doi: 10.1029/2007WR006666.
- D.C. Montgomery, E.A. Peck, e G.G. (2001). *Vining. Introduction to linear regression analysis*. Wiley Series in Probability and Statistics, third edition.
- T. G. Farr, Paul A. Rosen, Edward Caro, Robert Crippen, Riley Duren, Scott Hensley, Michael Kobrick, Mimi Paller, Ernesto Rodriguez, Ladislav Roth, David Seal, Scott Shaffer, Joanne Shimada, Jeffrey Umland, Marian Werner, Michael Oskin, Douglas Burbank, e Douglas Alsdorf. The shuttle radar topography mission. Rev. Geophys., 45(2), 05 2007. doi: 10.1029/2005RG000183. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2005RG000183>.
- J.R. Stedinger e G.D. Tasker (1985). Regional Hydrologic Analysis .1. Ordinary, Weighted, And Generalized Least-Squares Compared. *Water Resources Research*, 21(9):1421-1432. ISSN 0043-1397

5

Dati caratteristici dei corsi d'acqua lombardi



OBIETTIVI

Sul territorio della Lombardia, l'obiettivo dell'attività è stato l'ampliamento della base di dati e l'aggiornamento delle statistiche di livelli e portate dei corsi d'acqua lombardi.

La "Pubblicazione 17 - Dati caratteristici dei corsi d'acqua" [1], edita dal Servizio Idrografico Nazionale e riportante i valori delle portate medie ed al colmo per le sezioni rilevanti del bacino del Po, è stata pubblicata per l'ultima volta nel 1980 con dati di monitoraggio aggiornati al 1970. Pertanto, nell'intento di aggiornarla, si è effettuato il recupero e la stabilizzazione non solo dei colmi di piena ma delle intere serie storiche dei dati idrologici nelle sezioni regionali nel quarantennio 1971-2011, da cui estrarre le statistiche caratteristiche.

Per il periodo in esame sono disponibili presso ARPA Lombardia dati storici rilevati da stazioni meccaniche (idrometrografi a galleggiante) e manuali (letture meridiane degli osservatori), nonché dati pubblicati sugli Annali Idrologici, principalmente su supporto cartaceo e digitalizzati solo in parte, infine dati rilevati già in formato digitale dalla rete idrologica automatica in teletrasmissione, disponibili a partire dagli anni '90. L'aggiornamento della base di dati ha quindi riguardato l'integrazione di dati provenienti da diverse fonti, in modo da ottenere serie storiche digitali integrate con la massima continuità temporale possibile. A partire da queste serie integrate sono state aggiornate le statistiche delle portate: le medie giornaliere/mensili e i massimi annuali al colmo, in modo da dare continuità e aggiornamento ai valori pubblicati nella "Pubblicazione 17" [1-2] e alla stima probabilistica delle portate iniziata col progetto VAPI. Tutti i dati così raccolti ed elaborati sono stati pubblicati sul web su un portale cartografico [3], che raccoglie e rende disponibili dati di interesse idrologico di ARPA Lombardia.

L'ampliamento della base di dati è stato raggiunto attraverso tre macroattività:

1. Identificazione delle sezioni idrometriche rilevanti per la Lombardia:
 - individuazione delle sezioni storiche sulle quali compiere il recupero dei dati;
 - individuazione delle sezioni attuali, sulle quali proseguire o avviare la raccolta sistematica dei dati di livello idrometrico e portata;
 - individuazione di soluzioni tecniche adeguate per effettuare il monitoraggio idrologico nelle sezioni rilevanti attuali, da realizzare attraverso le attività istituzionali di ARPA Lombardia.
2. Recupero dei dati storici di livelli e portate per le sezioni rilevanti storiche:
 - individuazione dei dati cartacei disponibili sia nell'archivio idrografico storico di ARPA Lombardia sia presso altri soggetti istituzionali (es. Consorzi di Bonifica, Consorzi di Regolazione dei Laghi, AIPO Autorità di Bacino del fiume Po);
 - digitalizzazione dei dati di livello e portata;
 - ricostruzione delle scale di deflusso storiche;
 - validazione delle scale storiche attraverso test di affidabilità e analisi di omogeneità delle serie di portata ottenute.
3. Archiviazione integrata dei dati storici digitali e di quelli delle corrispondenti stazioni automatiche nel database idrologico di ARPA Lombardia:
 - integrazione delle serie storiche di livello idrometrico con serie di dati rilevati da corrispondenti stazioni automatiche, per ottenere, nei migliori casi, serie temporali dei livelli idrometrici complete sul periodo 1970-2011, di seguito definite "serie integrate";
 - inserimento delle serie integrate così ottenute nella banca dati digitale di ARPA Lombardia, per effettuare rapidamente le elaborazioni statistiche sulle portate.

L'aggiornamento delle statistiche di livelli e portate è stato raggiunto attraverso due macroattività:

1. aggiornamento delle statistiche di portata giornaliera, mensile, annuale e dei massimi annuali al colmo di piena per le "sezioni di progetto" aventi una base dati significativa;
2. stima probabilistica delle portate al colmo di piena aggiornando la procedura VAPI-GNDCI:
 - nelle sezioni strumentate: aggiornamento delle statistiche con i dati delle "serie integrate";
 - nelle sezioni non strumentate: definizione di una metodologia per la ricostruzione delle portate al colmo attraverso la simulazione idrologico-idraulica.

1. AMPLIAMENTO DELLA BASE DI DATI IDROLOGICI DELLE SEZIONI LOMBARDE

1.1 Individuazione delle sezioni idrometriche

1.1.1 Stazioni storiche

La scelta delle stazioni idrometriche storiche è stato il primo passo dell'attività di ricostruzione delle portate. La caratteristica principale di una stazione di monitoraggio è la significatività dal punto di vista del bilancio idrologico a livello regionale.

Le stazioni sono state selezionate in modo che rispondano ad almeno uno dei seguenti criteri:

- Ingressi/uscite da grandi laghi alpini regolati (Lago Maggiore, Lago di Como, Lago d'Isèo, lago d'Idro e Lago di Garda)
- chiusure di bacini montani di affluenti di I o II ordine di Po
- confluenze tra affluenti di I o II ordine di Po
- livelli dei grandi laghi alpini regolati

I dati pubblicati nella "Pubblicazione 17" hanno costituito la base di partenza su cui definire il set di stazioni storiche. Le sezioni ivi pubblicate per la Lombardia sono 8:

- Mincio a Monzambano (criterio a)
- Oglio a Capriolo (criterio a)
- Adda a Fuentes (criterio b)
- Adda a Lavello (criterio a)
- Brembo a Ponte Briolo (criterio b)
- Serio a Ponte Cene (criterio b)
- Lambro a Lambrugo (criterio b)
- Chiese a Gavardo (criterio b)

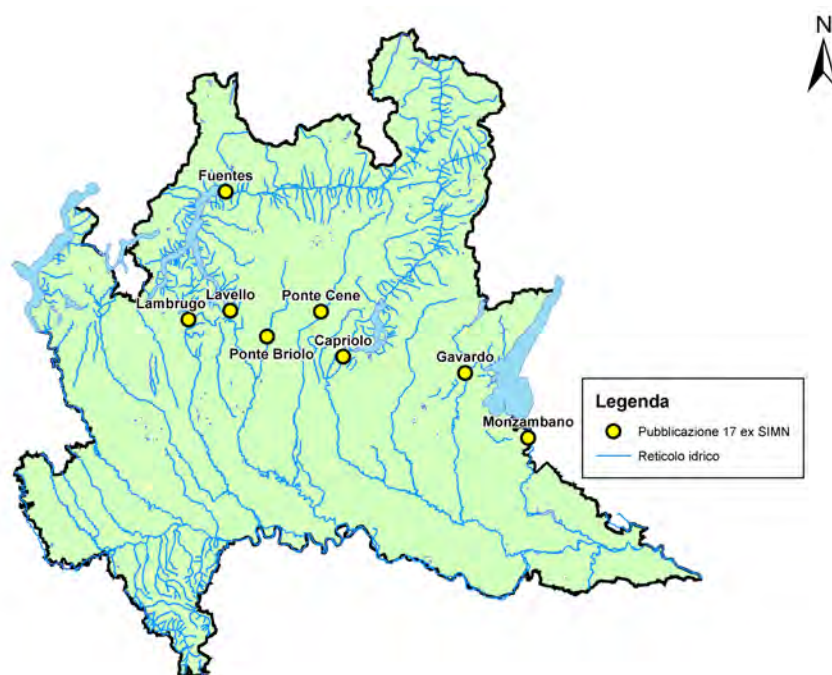


Figura 5.1 – Posizione geografica delle stazioni storiche lombarde pubblicate nella "Pubblicazione 17" dell'ex SIMN.

Integrando gli stessi criteri di selezione con l'analisi della consistenza e della qualità dei dati esistenti, sia cartacei che digitalizzati, si sono identificate 15 stazioni, riportate in Tabella 5.1 e rappresentate in Figura 5.2.

Stazione idrometrica	“Pubblicazione 17”	Ingresso-Uscita Grandi laghi	Confluenze	Chiusura bacini montani	Livello grandi laghi
Monzambano	X	Uscita Garda			
Capriolo	X	Uscita Iseo			
Gavardo	X			Chiese	
Fuentes	X	Ingresso Como		Adda Prelac	
Lavello	X	Uscita Como			
Ponte Briolo	X			Brembo	
Lodi			Adda+Serio		
Ponte Cene	X			Serio	
Lambrugo	X			Lambro	
Pizzighettone			Adda+Po		
Marcaria			Oglio+Po		
Ponte Gurone				Olona	
Malgrate					Como
Sesto Calende					Maggiore
San Colombano			Lambro+Po		

Tabella 5.1 – stazioni rilevanti storiche e criteri di scelta

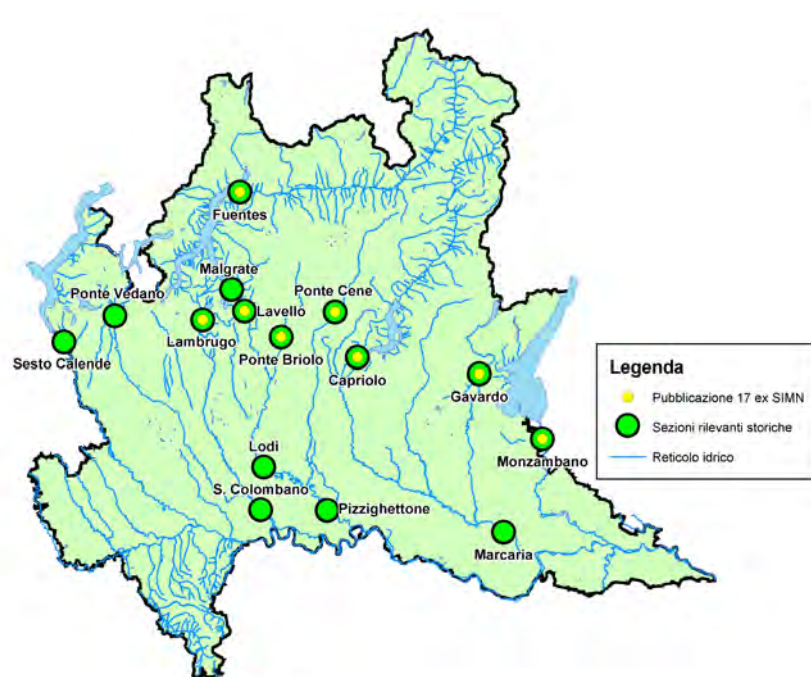


Figura 5.2 – Posizione geografica delle stazioni storiche selezionate all'interno del Progetto Flora.

1.1.2 Sezioni attuali

A partire dalla fine degli Anni '90 il Servizio Idrografico, prima come ente statale poi come ARPA Lombardia, ha operato una progressiva sostituzione delle stazioni idrometriche meccaniche a rilevamento su supporto cartaceo, con corrispondenti stazioni automatiche, le quali forniscono dati direttamente su supporto digitale.

A seguito di una ristrutturazione organica della rete regionale di monitoraggio in teletrasmissione, sono state individuate 50 sezioni di controllo, delle quali 47 sono già dotate di stazioni automatiche di livello idrometrico e 3 verranno installate nel corso del 2012.

Tutte le sezioni storiche individuate nel precedente Par. 2.1 sono sostituite da stazioni automatiche e oggi integrate nella rete di monitoraggio di ARPA Lombardia, o ad essa connesse (es. Marcaria appartiene alla rete di monitoraggio di AIPO che condivide con ARPA Lombardia i dati in teletrasmissione). Ciò permette di monitorare le sezioni con continuità rispetto al passato e quindi di mantenere aggiornate le serie storiche di livello e portata. In Figura 5.3 sono riportate le stazioni attuali selezionate, descritte in Tabella 5.2.

STAZIONE	CGB_EST	CGB_NORD	CORPO IDRICO	ATTUALE	STORICA	INIZIO MISURE
Teglio	1580180	5112197	Adda			dic-2012(2)
Fuentes - S.Agata	1531863	5110854	Adda	X	X	01/01/1998
S.Maria Lavello - Olginate	1533460	5070764	Adda	X	X	24/07/1998
Lodi - Ponte Adda SP235	1539897	5018543	Adda	X	X	24/07/1998
Pizzighettone	1561247	5003967	Adda	X	X	01/02/2001
Lomello	1484249	4996725	Agogna	X		01/01/2003
Cavaria	1485053	5059587	Arno	X		01/01/2004
Molteno	1523899	5070006	Bevera	X		01/01/2004
Camerata Cornelio	1551106	5083004	Brembo	X		01/01/2004
Ponte Briolo - Valbrembo	1545747	5062040	Brembo	X	X	24/07/1998
Galleria Agricoltori	1612886	5065651	Chiese	X		01/01/1998
Gavardo	1612431	5049788	Chiese	X	X	01/01/1998
Asola Idro	1610543	5008437	Chiese	X		07/10/2011
Malgrate	1529111	5078122	Lago di Como	X	X	29/07/2002
Como - Villa Geno	1506234	5074100	Lago di Como	X		24/07/1998
Porlezza Lago	1508993	5098106	Lago di Lugano	X		05/08/2011
Bosisio Parini	1522341	5072287	Lago di Pusiano			dic-2012(2)
Idro	1613800	5065966	Lago d'Idro	X		01/01/1998
Sarnico	1574566	5057398	Lago d'Iseo	X		12/04/2001
Luino	1480106	5094560	Lago Maggiore	X		24/07/1998
Sesto Calende	1472694	5060426	Lago Maggiore	X	X	26/01/2012
Casolino d'Erba	1518073	5075805	Lambro	X		24/07/1998
Lambrugo - Costa Masnaga	1519408	5067778	Lambro	X	X	17/10/2001
Peregallo	1523339	5053579	Lambro	X		24/07/1998
Milano - via Feltre	1519463	5037617	Lambro	X		24/07/1998
Orio Litta ⁽¹⁾	1541847	5001516	Lambro	X		24/01/2012
Chiavenna Inferno	1529010	5130298	Liro	X		13/01/2012
Bovegno	1598223	5070555	Mella	X		06/06/2001

Tabella 5.2 Elenco delle stazioni rilevanti attuali e raccordo con le stazioni rilevanti storiche.

(1): la stazione storica corrispondente è San Colombano al Lambro, (2): stazione in corso di installazione

STAZIONE	CGB_EST	CGB_NORD	CORPO IDRICO	ATTUALE	STORICA	INIZIO MISURE
Manerbio	1589748	5023574	Mella	X		04/09/2003
Ponte del Passo	1531557	5113652	Mera			dic-2012(2)
Monzambano	1633589	5028006	Mincio	X	X	01/02/2001
Darfo	1589788	5080356	Oglio	X		21/11/2001
Capriolo	1571414	5055346	Oglio	X	X	01/02/2001
Soncino	1569706	5027700	Oglio	X		05/03/2003
Marcaria (AIPO)	1620555	4996610	Oglio	X	X	25/06/1998
Ponte Vedano	1489818	5069183	Olona	X	X	24/07/1998
Castellanza	1492810	5050428	Olona	X		24/07/1998
Cremona - Ponte Po SS10	1578251	4997713	Po	X		01/02/2001
Spessa Po	1527245	4994326	Po	X		01/01/1998
Borgoforte	1638310	4989507	Po	X		01/01/1998
Sermide	1680464	4987228	Po	X		20/01/2000
Isola S. Antonio	1486024	4986980	Po	X		04/09/2003
Grabiasca	1573413	5095358	Serio	X		01/01/2004
Ponte Cene - Cene	1563914	5070459	Serio	X	X	01/01/2004
Montodine	1555804	5014663	Serio	X		06/07/2000
Cantù - Asnago	1507838	5062800	Seveso	X		24/07/1998
Palazzolo	1512429	5047728	Seveso	X		24/07/1998
Voghera - Ponte Staffora	1501407	4981890	Staffora	X		03/04/2003
Miorina	1472694	5060426	Ticino	X		24/07/1998
Vigevano - Ponte Ticino	1490600	5020906	Ticino	X		25/05/2000
Pavia - Ponte Ticino SS3	1511536	5002953	Ticino	X		04/05/2000

Tabella 5.2 Elenco delle stazioni rilevanti attuali e raccordo con le stazioni rilevanti storiche.
(1): la stazione storica corrispondente è San Colombano al Lambro, (2): stazione in corso di installazione

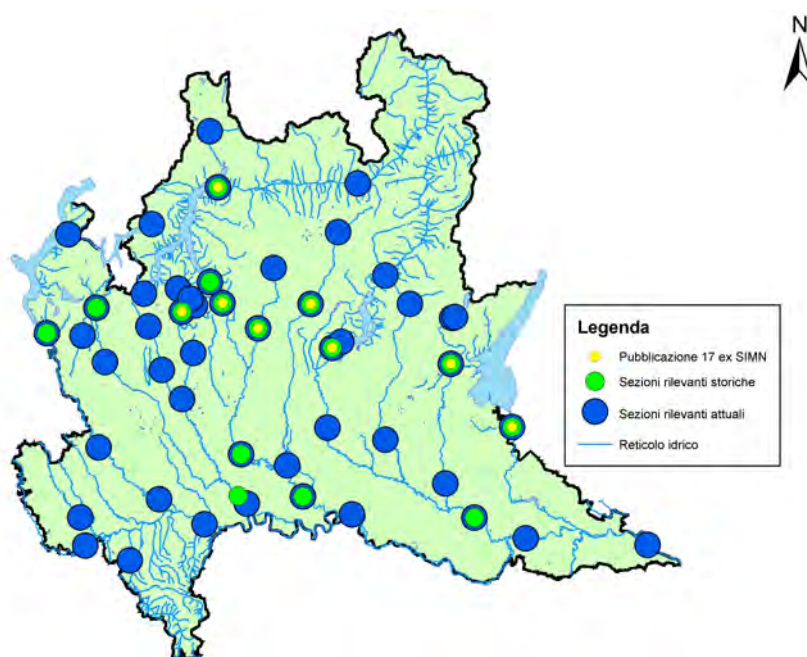


Figura 5.3 - Posizione geografica delle stazioni rilevanti storiche e attuali.

1.1.3 Individuazione soluzioni tecniche adeguate per monitoraggio delle portate

La gran parte delle stazioni idrometriche lombarde è costituita da sezioni “di controllo”, in cui l'idraulica del tratto d'alveo garantisce l'esistenza di una relazione biunivoca tra il livello e la portata transitante, la cosiddetta scala di deflusso, che può essere tempo-variante in dipendenza dalla stabilità della sezione stessa. In questi punti per monitorare i deflussi è sufficiente tarare la scala di deflusso con set di misure in campo effettuate con regolarità e misurare con continuità il livello; dal punto di vista strumentale la presenza di un idrometro automatico è adeguata allo scopo.

In nove delle sezioni rilevanti attuali (Figura 5.5) si verificano fenomeni di rigurgito che impediscono l'esistenza di un legame biunivoco tra livello e portata, a causa di fattori naturali o antropici. Si tratta in particolare di:

- 4 sezioni in prossimità di confluenze tra due corpi idrici, i cui regimi idraulici si influenzano reciprocamente: Pavia (Ticino+Po), S. Colombano al Lambro (Lambro+Po), Ponte Passo (Mera+Lago di Como) e Canonica d'Adda (Adda+Brembo)
- 5 sezioni a monte di sbarramenti di derivazione dotati di organi di manovra che variano con continuità, mediante i quali viene regolato il livello indipendentemente dalla portata: Golasecca, Sesto Calende, Pizzighettone, Ponte Cene e Montodine.

Nelle citate stazioni rilevanti, la portata dipende sia dal livello che dalla velocità della corrente, intesa come la velocità in ogni punto della sezione, pertanto una soluzione efficace per la stima delle portate è integrare il monitoraggio del livello con il monitoraggio della velocità della corrente (Figura 5.4); questa metodologia per la valutazione della portata si definisce “della portata indice” [4].

Sulle nove sezioni rigurgitate è stata valutata l'applicabilità di sensori doppler innovativi per il monitoraggio sistematico delle velocità della corrente (sensori Acoustic Doppler Velocity Measurement, di seguito ADVM), mediante il metodo della velocità indice [4]. La fattibilità delle installazioni dipende dall'idraulica, dalla forma della sezione bagnata e dalla distribuzione delle velocità in alveo, ma pure dalle condizioni logistiche e dai costi effettivi di installazione e manutenzione.

Si è costruito un sistema di valutazione dell'idoneità delle sezioni al monitoraggio della portata con gli ADVM sulla base dei seguenti fattori:

- andamento dei livelli idrometrici rilevati alla sezione
- forma della sezione trasversale, ottenuta da rilievi topografici o con misure di portata
- distribuzione delle velocità in alveo al variare delle condizioni di rigurgito di valle, ottenute con misure di portata
- logistica della messa in opera e costi di installazione (es: necessità di ulteriori opere oltre ai supporti degli strumenti, facilità di accesso alla strumentazione).

Dapprima si è assegnato un punteggio ad ogni sezione in una scala da 1 a 10, che valuti l'applicabilità “metodologica” della velocità indice: al valore 1 corrispondono le migliori condizioni e al valore 10 le peggiori. A questo punteggio si è aggiunto anche un punteggio, strutturato analogamente da 1 a 10, di “messa in opera”, che tenga conto della facilità o meno della realizzazione e dei costi di installazione del sistema nel punto identificato.

Il giudizio di idoneità complessivo sull'applicabilità del metodo (Tabella 5.3) è la sintesi dei due punteggi metodologico e di messa in opera, e deriva dall'analisi di tutti i fattori (idraulici, morfologici, logistici, tecnici, ecc.), predisponenti e determinanti, che concorrono in varia misura nella fattibilità dell'opera.

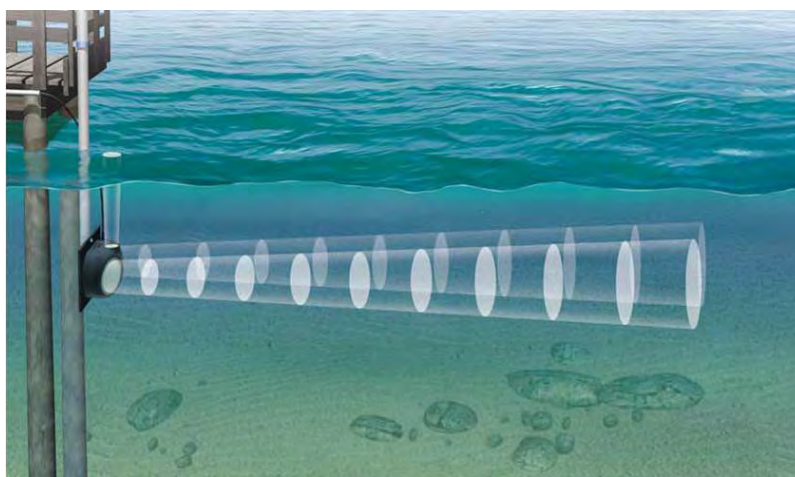


Figura 5.4 – misura dell'indice di velocità da parte del sensore ADVM.

Sezione	Coordinate	PUNTEGGIO Velocità Indice	PUNTEGGIO Messa in opera	IDONEITÀ S/N
Ticino a Sesto Calende	N45'43.4 E09'38.2	8	7	N
Ticino a Golasecca	N45'42.4 E08'39.3	2	3	S
Ticino a Pavia	N45'10.7 E09'09.6	2	3	S
Lambro a S.Colombano	N45'09.9 E09'31.9	3	4	S
Mera a Ponte Passo	N46'10.4 E09'24.3	2	3	S
Adda a Canonica d'Adda	N45'34.6 E09'32.1	7	8	N
Adda a Pizzighettone	N45'11.2 E09'46.8	3	3	S
Serio a Ponte Cene	N45'47.1 E09'49.3	3	4	S
Serio a Montodine	N45'17.0 E09'42.8	3	3	S

Tabella 5.3 – Idoneità delle sezioni idrometriche di progetto rigurgitate all'installazione dei sensori ADVM

Dall'analisi di idoneità risulta che 7 sezioni rigurgitate sono idonee all'installazione dei sensori ADVM, pertanto nel 2012 è stato avviato il procedimento amministrativo per le installazioni, che saranno finanziate con fondi istituzionali.

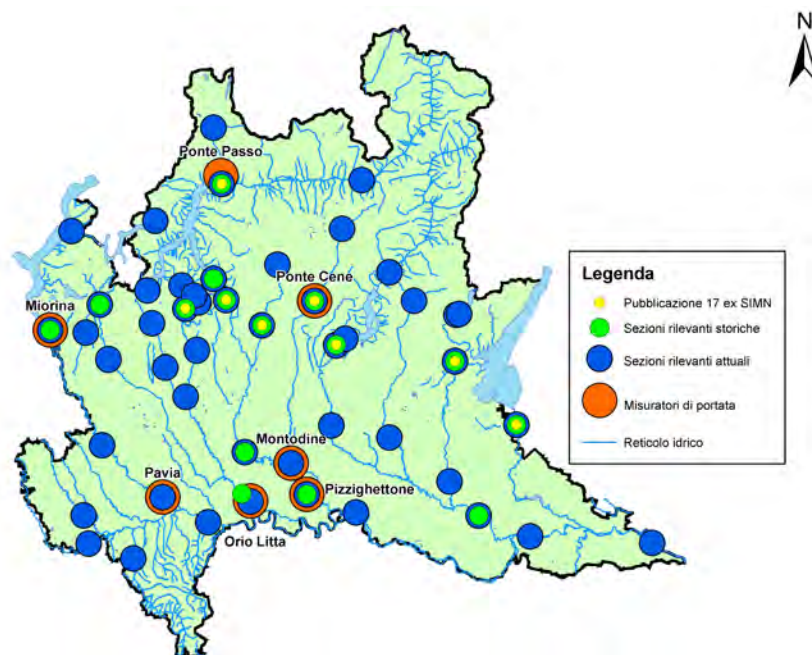


Figura 5.5 – Posizione geografica delle sezioni scelte per l'installazione di sensori ADVM

2. RECUPERO DEI DATI STORICI

2.1 Raccolta dati cartacei da digitalizzare

Individuate le sezioni di progetto è stato avviato il recupero dei dati storici disponibili. I dati oggetto di ricerca sono stati l'andamento dell'altezza idrometrica nel tempo, misure di portata storiche da associare ai livelli e scale di deflusso elaborate sia dal Servizio Idrografico, e quindi presenti in archivio, sia da altri enti.

La ricerca dei dati storici è stata effettuata dapprima presso l'archivio idrografico di Arpa Lombardia (Figura 5.6) e successivamente affinata, coinvolgendo Enti Pubblici e soggetti privati che si occupano di monitoraggio dei corsi d'acqua. In particolare è stata proficua la collaborazione con i consorzi di regolazione dei laghi (Adda e Chiese) per il recupero delle misure di portata e delle scale di portata storiche.



Figura 5.6 – L'archivio idrografico di Arpa Lombardia

Tutte le sezioni rilevanti storiche erano dotate di un idrometrografo registratore e di un'asta graduata per la lettura giornaliera meridiana da parte di un osservatore incaricato. I dati dei diagrammi idrometrografici e delle schede mensili compilate dagli osservatori, nonché le effemeridi, già digitalizzati sono presenti nella banca dati

idrologica di ARPA Lombardia, ma non sempre tutti i dati cartacei sono stati tradotti in digitale, quindi si è deciso in prima battuta di effettuare il recupero dei dati cartacei da digitalizzare per il periodo di riferimento.

Le idrometrografie (diagrammi cartacei) sono state il primo obiettivo della ricerca dei dati storici. Dall'analisi del materiale è emerso che per quasi tutte le stazioni i dati cartacei ricoprono il periodo 1970-1999. Le idrometrografie non sempre risultano complete, talvolta i dati non sono stati rilevati a causa di rotture o malfunzionamenti dello strumento, o in seguito a lavori in alveo. Inoltre non tutti i diagrammi raccolti durante il funzionamento risultano leggibili, quindi traducibili in dati affidabili. Una descrizione riassuntiva della disponibilità di dati affidabili per stazione è riportata nella Tabella 5.4.

STAZIONE IDROMETRICA	NUMERO TOTALE DIAGRAMMI CARTACEI	NUMERO DIAGRAMMI CON DATI AFFIDABILI	ANNI dal – al
Adda a Fuentes	1327	1296	1971 – 1998
Adda a Lavello	1464	1460	1971 – 1998
Adda a Pizzighettone	777	762	1971 – 1995
Brembo a Ponte Briolo	1474	1473	1970 – 1998
Serio a Ponte Cene	1373	1368	1970 – 1998
Lago di Como a Malgrate	1292	1286	1971 – 1995
Oglio a Capriolo	397	397	1970 – 1977
Oglio a Marcaria	911	911	1977 – 1997
Mincio a Monzambano	1558	1558	1971 – 2000
Chiese a Gavardo	1233	1233	1970 – 1997
Lambro a Lambrugo	242	242	1970 – 1976
Lambro a San Colombano	1298	1291	1970 – 1996
Olona a Ponte Gurone	686	665	1970 – 1984
Lago Maggiore a Sesto Calende	1597	1597	1971 – 2001
TOTALE	15629	15539	1970 – 2001

Tabella 5.4 – Diagrammi idrometrici cartacei per le stazioni di progetto

Il totale delle idrometrografie recuperate corrisponde a 15539 diagrammi ritenuti affidabili, in quanto contenenti un'informazione chiara e traducibile in un valore e, quindi, digitalizzabile. In Figura 5.7 sono riportati alcuni esempi di diagrammi cartacei nei diversi formati presenti.

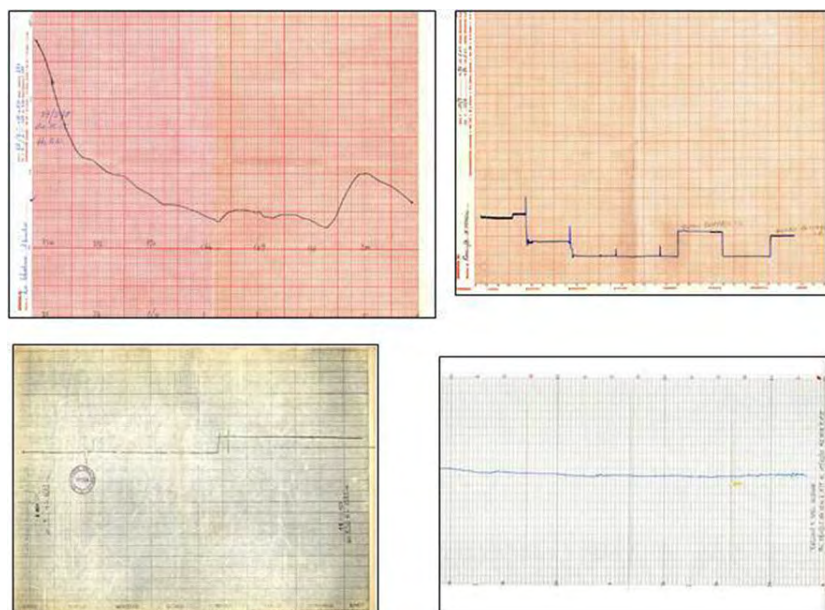


Figura 5.7 – Esempi di diagrammi cartacei.

La ricerca dei dati storici per le sezioni di progetto ha interessato, oltre alle idrometrografie, anche i dati delle misure di portata effettuate nel periodo di studio. Anche in questo caso si è fatto riferimento, in primo luogo, all'archivio idrografico di Arpa Lombardia, integrandolo, quando disponibili, con i dati in possesso di altri Enti, in particolare i Consorzi di Bonifica e i Consorzi di Regolazione dei Laghi.

L'importanza di recuperare le misure storiche di portata è duplice: da un lato, infatti, permettono di validare e confermare le scale di portata storiche riferite allo stesso intervallo temporale, dall'altro, in assenza di scale di portata validate per il periodo di esecuzione delle misure, permettono di calcolare l'equazione della scala di portata.

In totale, si sono recuperati circa 350 referti di misure (Tabella 5.5) che sono stati digitalizzati e inseriti nella banca dati idrologica del Servizio Idrografico. Le informazioni di interesse informatizzate sono state: il valore dell'altezza idrometrica e il corrispondente valore di portata, la variazione di altezza tra inizio e fine misura, data e ora di effettuazione, tipo di strumentazione utilizzata e, quando disponibili, i valori che descrivono la sezione idrologica quali, ad esempio, la profondità minima, media e massima, la velocità massima e media della corrente, la larghezza e l'area della sezione, il perimetro bagnato.

Dall'analisi dei dati raccolti è emerso che, per alcune sezioni di progetto, le misure sono state interrotte nei primi anni settanta per riprendere a fine anni ottanta o all'inizio degli anni novanta. In generale, si è evidenziata una lacuna nelle misure di portata per gli anni ottanta. Questa mancanza ha rappresentato un limite per la ricostruzione delle scale di deflusso.

STAZIONE IDROMETRICA	NUMERO MISURE DI PORTATA (1970 – 2000)	DISTRIBUZIONE DELLE MISURE NEGLI ANNI
Fuentes	71	Periodi 1970-1971 e 1981-2000
Lavello	65	Periodi 1970-1980 e 1991-1999
Pizzighettone	27	Periodo 1970-1976
Ponte Briolo	19	Concentrate negli anni 90
Ponte Cene	11	Periodo 1970-1971
Malgrate	N.A.	
Capriolo	12	Solo per gli anni 1970 e 1977
Marcaria	12	Periodi 1970-1976 e 1996-1999
Monzambano	10	Periodo 1973-1979
Gavardo	84	Inizio anni 70 e dal 1986 al 2000
Lambrugo	7	Solo per gli anni 1970 e 1972
San Colombano	13	Periodo 1992-1999
Ponte Gurone	13	Periodo 1970-1973
Sesto Calende	N.A.	

Tabella 5.5 – Distribuzione delle misure di portata negli anni per le sezioni di progetto

Le scale di deflusso storiche sono state recuperate dalle seguenti fonti:

- annali Idrologici (Parte II – Sezione C)
- comunicazioni Ufficiali di adozione delle scale, inviate all'ex SIMN dai Consorzi di Bonifica
- lavori tecnici eseguiti "ad hoc" da enti pubblici, soggetti privati ed università
- idrometrografie sulle quali fossero trascritte manualmente coppie di valori di H e Q riferite ad un determinato istante temporale.

In molti casi il materiale cartaceo recuperato è consistito in tabelle contenenti la scala numerica delle portate (Figura 5.8), che rappresenta la traduzione numerica della relazione tra portate e altezze idrometriche. Quando non già indicata, si è ricavata, per ogni scala numerica di portata recuperata, la corrispondente espressione matematica che la descrive.

23 11 91		ADDA A LAVELLO S. M.									
SCALA DELLE PORTATE		per H=329		Q=0,624H-0,97M ² 683168							
in vigore dall'01-10-91		per H=230		Q=0,239207*(H-30) ³ 1.347383							
H/Q	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	
100	22,8	23,1	23,4	23,7	24,0	24,3	24,6	25,0	25,3	25,6	
110	29,2	29,5	29,9	30,2	30,5	30,9	31,3	31,6	32,0	32,3	
120	36,5	36,9	37,3	37,7	38,1	38,5	38,9	39,3	39,7	40,1	
130	44,8	45,3	45,7	46,2	46,7	47,1	47,6	48,0	48,5	49,0	
140	54,3	54,8	55,3	55,8	56,4	56,9	57,4	57,9	58,4	59,0	
150	65,0	65,5	66,1	66,7	67,2	67,8	68,4	69,0	69,6	70,2	
160	76,8	77,5	78,1	78,7	79,4	80,0	80,6	81,2	81,9	82,6	
170	90,0	90,7	91,4	92,1	92,8	93,5	94,2	94,9	95,6	96,3	
180	104,5	105,2	106,0	106,7	107,5	108,2	109,1	109,8	110,6	111,4	
190	120,2	121,1	122,0	122,8	123,6	124,5	125,3	126,2	127,0	127,9	
200	137,6	138,5	139,4	140,3	141,2	142,1	143,0	144,0	144,9	145,8	
210	156,1	157,1	158,1	159,1	160,1	161,1	162,1	163,1	164,1	165,1	
220	176,6	177,7	178,7	179,8	180,9	181,9	183,0	184,1	185,2	186,2	
230	199,4	199,7	197,2	198,1	199,1	200,0	200,9	201,8	202,7	203,6	
240	213,8	214,7	215,7	216,6	217,5	218,4	219,4	220,3	221,3	222,3	
250	232,6	233,5	234,5	235,4	236,4	237,3	238,3	239,3	240,2	241,2	
260	251,0	252,0	253,0	254,0	255,0	256,0	257,0	258,0	259,0	260,0	
270	271,3	272,3	273,3	274,3	275,3	276,3	277,3	278,3	279,3	280,3	
280	291,3	292,3	293,3	294,3	295,3	296,3	297,3	298,4	299,4	300,4	
290	311,6	312,6	313,6	314,7	315,7	316,7	317,8	318,8	319,8	320,8	
300	332,2	333,3	334,3	335,4	336,4	337,5	338,5	339,6	340,6	341,7	
310	353,2	354,3	355,4	356,4	357,5	358,5	359,6	360,7	361,7	362,8	
320	374,5	375,6	376,7	377,8	378,9	379,9	381,0	382,1	383,2	384,2	
330	396,1	397,2	398,3	399,4	400,5	401,6	402,7	403,8	404,9	406,0	
340	418,1	419,2	420,3	421,4	422,5	423,6	424,7	425,8	427,0	428,1	
350	440,4	441,5	442,6	443,7	444,8	446,0	447,1	448,2	449,3	450,5	
360	462,9	464,0	465,2	466,3	467,4	468,6	469,7	470,9	472,0	473,1	
370	485,7	486,9	488,0	489,2	490,3	491,5	492,6	493,8	494,9	496,1	
380	508,8	510,0	511,2	512,3	513,5	514,6	515,8	517,0	518,1	519,3	
390	532,2	533,4	534,6	535,7	536,9	538,1	539,3	540,4	541,6	542,8	
400	555,8	557,0	558,2	559,4	560,6	561,8	563,0	564,2	565,4	566,6	
410	579,8	581,0	582,2	583,4	584,6	585,8	587,0	588,2	589,4	590,6	
420	603,9	605,1	606,3	607,5	608,7	610,0	611,2	612,4	613,6	614,8	
430	628,3	629,6	630,8	632,0	633,2	634,5	635,7	636,9	638,2	639,4	
440	653,0	654,2	655,5	656,7	658,0	659,2	660,4	661,7	662,9	664,2	
450	677,9	679,1	680,4	681,7	682,9	684,2	685,4	686,7	687,9	689,2	
460	703,0	704,3	705,6	706,8	708,1	709,4	710,6	711,9	713,2	714,4	
470	728,4	729,7	731,0	732,2	733,5	734,8	736,1	737,4	738,6	739,9	
480	754,0	755,3	756,6	757,9	759,2	760,5	761,7	763,0	764,3	765,6	
490	779,9	781,2	782,5	783,7	785,0	786,3	787,6	788,9	790,2	791,5	
500	805,9	807,2	808,5	809,8	811,1	812,5	813,8	815,1	816,4	817,7	
510	832,2	833,5	834,8	836,1	837,5	838,8	840,1	841,4	842,8	844,1	
520	858,7	860,0	861,3	862,7	864,0	865,3	866,7	868,0	869,3	870,7	

Figura 5.8 – Esempio di scala numerica delle portate per la stazione di Lavello – Adda.

2.2 Digitalizzazione dei dati di livello e portata

La digitalizzazione dei diagrammi idrometrografici è stata eseguita con i seguenti criteri:

- restituzione dei dati digitali con risoluzione temporale ai 15 minuti;
- interpolazione lineare dei valori nel caso di dati mancanti, fino ad un massimo di 3 ore consecutive;
- massima differenza accettabile tra il dato digitalizzato e il dato cartaceo fissata a 3 cm;
- rielaborazione dei dati al passaggio tra due diagrammi consecutivi in caso di evidenti traslazioni accidentali di livello o di tempo, in modo da garantire la continuità e la consistenza delle informazioni;
- ricostruzione, ove possibile, di dati mancanti e anomali;
- assegnazione a tutti i dati digitalizzati di un opportuno codice di qualità (esempi: 001 = dato certo, 002 = dato interpolato o ricostruito, 160 = dato da fondo scala inferiore, 201 = dato mancante);

Il processo di digitalizzazione ha richiesto un anno di lavoro al termine del quale sui dati in formato digitale è stata compiuta un'accurata verifica, effettuata secondo due differenti tecniche complementari. Dapprima si è effettuato il confronto visivo tra i dati digitalizzati graficati a video e i corrispondenti diagrammi cartacei, ponendo particolare attenzione alle situazioni di passaggio tra diagrammi consecutivi, al cambio di anno e, in linea con l'obiettivo finale, ai picchi di livello presenti nei dati. In seconda battuta si è effettuato sistematicamente il confronto dei valori meridiani digitalizzati con quelli pubblicati sugli Annali Idrologici, nella Parte seconda, Sezione B - Tabella 1. È emersa un'ottima corrispondenza tra i dati, sia sui valori di livello che sui tempi di accadimento, (Tabella 5.6). Un confronto analogo è stato possibile anche per alcune stazioni non pubblicate sugli Annali grazie alla collaborazione con i Consorzi di Bonifica, che hanno fornito le tabelle riassuntive storiche delle idrometrie, indicanti data, ora e valore del livello, per alcune delle stazioni di progetto.

STAZIONE	LIVELLI DIGITALIZZAZIONI (m)	LIVELLI ANNALI (m)	DIFFERENZA LIVELLI (m)	DATA DIGITALIZZAZIONI	DATA ANNALI	DIFFERENZA DATE (giorni)	NOTE SULLA DIGITALIZZAZIONE
Adda a Lavello	4.43	4.45	-0.02	10/07/1980	10/07/1980	0	corretta
Adda a Lavello	4.2	4.2	0	26/05/1981	28/05/1981	-2	errore
Adda a Lavello	3.87	3.85	0.02	13/06/1982	13/06/1982	0	corretta
Adda a Lavello	4.6	4.6	0	24/05/1983	24/05/1983	0	corretta
Adda a Lavello	3.53	3.52	0.01	06/10/1984	06/10/1984	0	corretta
Adda a Lavello	3.73	3.73	0	09/06/1985	09/06/1985	0	corretta
Adda a Lavello	3.88	3.88	0	30/05/1986	30/05/1986	0	corretta
Adda a Lavello	5.21	5.21	0	21/07/1987	21/07/1987	0	corretta

Tabella 5.6 – Confronto tra i dati digitalizzati (letture ore 12.00) e i rispettivi valori pubblicati sugli Annali. Si nota un'ottima corrispondenza nei valori ed un errore individuato nelle date.

Questo tipo di controllo, affiancato al confronto diretto con i diagrammi cartacei, ha permesso di individuare e correggere, oltre agli errori nei dati digitalizzati, anche eventuali inesattezze presenti nei dati già pubblicati. Per la stazione di Mincio a Monzambano, ad esempio, gli Annali Idrologici riportano dati errati di altezza idrometrica alle ore 12.00 per gli anni 1986 e 1987 (Tabella 5.7).

Valore esatto di H da diagrammi cartacei	Data esatta da diagrammi cartacei	Valore errato pubblicato sull'Annale Idrologico	Data errata pubblicato sull'Annale Idrologico
2.63	23/05/1986	3.98	11/07/1986
1.4	30/10/1987	3.99	22/07/1987

Tabella 5.7 – Mincio a Monzambano: errori sui dati pubblicati negli Annali Idrologici

A conclusione della fase di digitalizzazione, quando possibile, si è cercato di integrare le lacune, comunque presenti nei dati, digitalizzando i valori dei livelli alle ore 12.00 pubblicati sugli Annali Idrologici. In questa maniera ogni serie ha almeno il dato meridiano, quando è stato pubblicato.

2.3 Ricostruzione delle scale di deflusso storiche e validazione attraverso test di affidabilità

Quando le caratteristiche idrauliche sono adatte, in una data sezione fluviale esiste una relazione biunivoca tra portate e livelli idrometrici, ovvero la scala di deflusso. La raccolta dei dati riguardanti le scale di deflusso storiche ha prodotto il recupero di un insieme di scale già pubblicate con relativo periodo di applicabilità ed un elevato numero di misure di portata. Per le sezioni storiche di progetto non pubblicate sugli Annali Idrologici o per le quali non si è riusciti a recuperare scale di portata storiche già pubblicate, è stato necessario stimare le equazioni delle scale a partire dalle misure di portata disponibili.

La formula generica dell'equazione adottata è del tipo

$$Q = a \cdot (H + b)^c \quad (1)$$

dove:

Q è la portata da valutare

a e c sono costanti caratteristiche della sezione idrologica in un dato intervallo temporale e per un dato range di livelli idrometrici da H_{\min} a H_{\max}

H è il livello idrometrico in corrispondenza del quale valutare la portata Q

b è il valore di H al quale si azzerava la portata Q

I valori dei parametri a , b e c sono stati ricavati per inferenza minimizzando gli errori percentuali, tra Q_m misurata e Q_c calcolata ad un fissato livello idrometrico H_m .

Una volta integrato l'insieme delle scale di deflusso con quelle storiche di nuova elaborazione, tutte le scale sono state sottoposte ad un processo di validazione su un periodo di validità di tentativo. Ogni scala è stata sottoposta a 5 differenti test definiti nella norma ISO 110/2 [5].

Nello specifico, i test applicati sono stati:

- "Value bias" test: che valuta, per una specifica scala, lo scostamento dallo zero della media degli errori percentuali tra Q misurata e Q calcolata. Se lo scostamento è troppo elevato il test fallisce.
- "Sign bias" test: il test non è superato se il numero degli errori con segno negativo, tra Q misurata e Q calcolata, risulta troppo differente dalla metà del totale degli errori.
- "Time Runs" test: il test fallisce se si riscontra che l'andamento degli errori, tra Q misurata e Q calcolata, non risulta casuale (presenza di un trend negli errori, riferito al tempo).
- "Stage Runs" test: il test fallisce se si riscontra che l'andamento degli errori, al variare dei livelli idrometrici, non risulta casuale (presenza di un trend negli errori, riferibile alla variazione dei livelli idrometrici).
- "Percentage of gaugings within a percentage of rated discharge" test: almeno l'80% delle misure di portata, riferite al periodo di validità di una specifica scala, non deve discostarsi per più dell' $X\%$ dal valore di portata calcolato tramite la scala stessa. Il valore di X è scelto dall'operatore.

In Figura 5.9 si riporta, come esempio, il risultato ottenuto applicando i test di validità alla scala di portata, valida dal 1973 al 1993 compresi, per la stazione di Ponte Briolo.

Condizione necessaria per l'applicabilità dei test di validità è l'esistenza di misure dirette di portata effettuate nel periodo di applicabilità della scala di portata sottoposta a validazione. Per la maggior parte delle scale di deflusso i test sono stati superati supponendo accettabili scostamenti tra Q misurata e Q calcolata, compresi tra +/- l'8% e il 15%.

Un controllo di robustezza delle scale così validate è stato effettuato estraendo sia i valori di portata media giornaliera che i massimi di portata mensili ed annuali e confrontandoli con i dati pubblicati sugli Annali Idrologici o sulle tabelle cartacee compilate, nel tempo, dai Consorzi. I risultati del confronto sono molto soddisfacenti (Tabella 5.8): gli scostamenti tra i valori estratti dai dati e quelli pubblicati sono sempre molto contenuti, le portate medie giornaliere sono spesso coincidenti e le differenze nei massimi di portata media giornaliera sono quasi sempre inferiori al 5% e, comunque, sempre al di sotto del 10%.

Con quest'ultima verifica si può ritenere che la base di dati così ottenuta è concorde e coerente con quanto pubblicato finora, perciò si ritiene definitivamente stabilizzata sul periodo di riferimento, non solo per le statistiche medie ma anche per le portate al colmo.

Site	PONTE BRIOLO
VarFrom	100 (livello idrometrico)
VarTo	140 (portata)
Table:	
Number	173.0 (ID-identificativo della scala di portata)
Name	FLORA(73-93) (nome dato alla scala)
Gaugings	9 (numero di misure di portata ricadenti nell'intervallo di validità della scala)
Test results:	
Value Bias:	Pass. Mean % errs: 1.415, confidence -7.321..10.150
Sign Bias:	Pass. Tot +ve errs: 5, should be within 0..8
Time Runs:	Pass. Runs: 4, should be at least 1
Stage Runs:	Pass. Runs: 5, should be at least 1
% Within:	Pass. 100.0% (9 of 9) were within, must be at least 80%

Figura 5.9 – Risultati dei test di validità effettuati su di una delle scale storiche individuate per la stazione di Ponte Briolo sul Brembo.

MAX Q _{mg} DIAGRAMMI (mc/s)	MAX Q _{mg} ANNALI (mc/s)	DIFFERENZA MAX Q _{mg} (mc/s)	DIFFERENZA %	DATA DIAGRAMMI	DATA ANNALI	DIFFERENZA DATE (giorni)
411.604	411	0.604	0.14	26/06/1971	26/06/1971	0
448	451	-2.877	-0.64	14/06/1972	14/06/1972	0
582.47	567	15.47	2.73	19/07/1973	19/07/1973	0
351.852	348	3.852	1.10	30/06/1974	30/06/1974	0
476.75	470	6.749	1.43	18/06/1975	18/06/1975	0
879.052	898	-18.948	-2.11	05/10/1976	05/10/1976	0
642.621	643	-0.379	-0.06	01/09/1977	01/09/1977	0
511.316	512	-0.684	-0.13	06/07/1978	06/07/1978	0
863.382	868	-4.618	-0.53	18/10/1979	18/10/1979	0
638.616	651	-12.384	-1.90	10/07/1980	10/07/1980	0
590.092	588	2.092	0.356	26/05/1981	27/05/1981	1
501.784	492	9.784	1.99	13/06/1982	13/06/1982	0
701.495	707	-5.505	-0.78	24/05/1983	24/05/1983	0
424.054	442	-17.946	-4.06	06/10/1984	06/10/1984	0
505.929	503	2.929	0.58	08/06/1985	08/06/1985	0
538.416	537	1.416	0.26	30/05/1986	30/05/1986	0
919.31	918	1.31	0.14	21/07/1987	20/07/1987	1

Tabella 5.8 – Adda a Lavello. Confronto tra i dati digitalizzati (massime portate medie giornaliere, Qmg) con i rispettivi valori pubblicati sugli Annali. Si nota un'ottima corrispondenza nei valori con differenze percentuali sempre al di sotto del 5%. Dal raffronto con i diagrammi cartacei gli errori nelle date son sempre risultati refusi di stampa degli Annali.

Tutte le scale di portata ottenute sono state inserite nella banca dati idrologica del Servizio Idrografico di Arpa Lombardia, associando all'equazione il rispettivo periodo di applicabilità.

L'importazione nella medesima banca dati dei livelli idrometrici digitalizzati, delle misure di portata e delle scale di portata storiche per le stazioni di progetto e la loro integrazione con i dati digitali già presenti, sia da precedenti digitalizzazioni sia da stazioni automatiche, ha permesso di ricostruire serie storiche con quasi 40 anni di dati, dal 1970 al 2011. Inoltre è stato possibile per alcune stazioni, ricostruire la continuità dei dati, digitalizzando, per gli anni mancanti, i dati delle altezze alle ore 12.00 ed i valori di altezza massima riportati sugli Annali o su diagrammi non ancora digitalizzati.

La stazione di Oglio a Marcaria rappresenta un esempio rilevante in questo senso (Figura 5.10): le idrometrografie digitalizzate coprivano gli anni dal 1977 al 1997, mentre i dati digitali da stazione automatica iniziavano nel 1998, compreso, fino ad oggi. Sono stati digitalizzati, quindi, i valori presenti sugli Annali di altezza meridiana ed i massimi ricavati dalle idrometrografie per gli anni 1970-1976. Si è così ottenuta una serie di livelli sul periodo 1970-2011. Inoltre, dalle misure di portata recuperate, è stato possibile ricavare le scale per il periodo 1970-1977 e per il periodo 1996-2011. Valutatane l'applicabilità, al periodo 1977-1996 è stata, di conseguenza, attribuita una scala di tipo "phased", che calcola i valori di portata Q pesando il passaggio, tra la scala precedente e quella successiva in modo lineare in base alla posizione temporale.

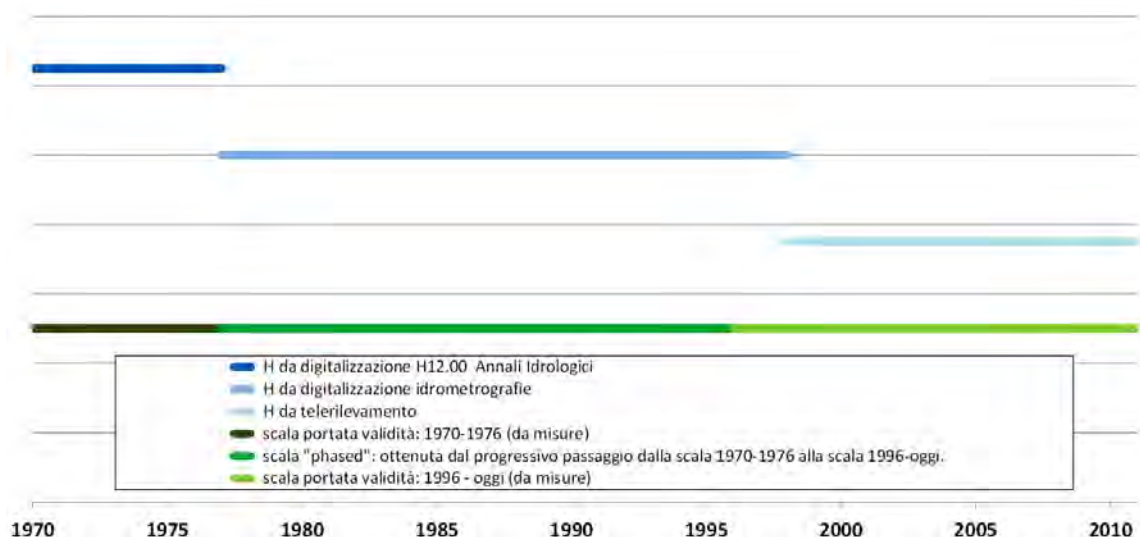


Figura 5.10 - Diagramma della ricostruzione delle serie storiche di livello e delle scale di deflusso per la stazione idrometrica di Marcaria.

3. AGGIORNAMENTO DELLE STATISTICHE DI LIVELLI E PORTATE

3.1 Estrazione e aggiornamento delle statistiche sulle altezze idrometriche e sulle portate

Dopo aver eseguito il controllo e la validazione sia dei livelli digitalizzati che delle scale di deflusso storiche, i dati sono stati inseriti nella banca dati idrologica di ARPA Lombardia e sono stati integrati alle serie dei dati ottenuti dalle stazioni automatiche in teletrasmissione. Nel migliore dei casi si sono ottenute serie storiche di livelli e portate continue nel periodo 1970-2011.

Dai dati così strutturati mediante procedure automatiche consolidate già in uso presso l'ufficio è stato possibile effettuare l'estrazione delle statistiche su livelli e portate, in particolare le portate medie, mensili ed annuali, i massimi di altezza idrometrica e di portata mensili ed annuali. Questi dati permettono l'aggiornamento e la continuazione della "Pubblicazione 17" dell'ex SIMN.

In Tabella 5.9 e Tabella 5.10 sono riportati esempi di estrazione di massimi annuali e portate medie giornaliere della stazione di Fuentes.

Sorgente dati	Data	H max (m)	Qmax (mc/s)
DIAGRAMMI CARTACEI	12/06/1972	1.67	341
DIAGRAMMI CARTACEI	16/07/1973	2.5	669
DIAGRAMMI CARTACEI	29/06/1974	1.25	214
DIAGRAMMI CARTACEI	16/09/1975	1.88	415
DIAGRAMMI CARTACEI	03/10/1976	2.58	705
DIAGRAMMI CARTACEI	27/09/1981	2.34	587
DIAGRAMMI CARTACEI	07/09/1982	1.98	448
DIAGRAMMI CARTACEI	23/05/1983	2.34	587
DIAGRAMMI CARTACEI	05/09/1984	1.41	258
DIAGRAMMI CARTACEI	26/08/1985	2.22	539
DIAGRAMMI CARTACEI	29/05/1986	1.79	380
CONSORZIO ADDA	19/07/1987	3.33	1092
DIAGRAMMI CARTACEI	12/10/1988	2.68	737
DIAGRAMMI CARTACEI	06/06/1990	1.62	309
DIAGRAMMI CARTACEI	17/06/1991	2.78	845
DIAGRAMMI CARTACEI	01/09/1992	1.95	461
DIAGRAMMI CARTACEI	14/10/1993	2.73	819

Sorgente dati	Data	H max (m)	Qmax (mc/s)
DIAGRAMMI CARTACEI	15/09/1994	2.2	567
DIAGRAMMI CARTACEI	13/09/1995	1.22	203
DIAGRAMMI CARTACEI	14/11/1996	1.99	477
DIAGRAMMI CARTACEI	28/06/1997	2.77	840
AUTOMATICO	12/09/1998	1.79	398
AUTOMATICO	20/09/1999	2.87	892
AUTOMATICO	11/06/2001	2.87	720
AUTOMATICO	16/11/2002	3.04	804
AUTOMATICO	29/08/2003	2.01	351
AUTOMATICO	02/11/2004	2.14	400
AUTOMATICO	19/07/2005	1.53	190
AUTOMATICO	24/10/2006	2.05	366
AUTOMATICO	15/06/2007	1.78	269
AUTOMATICO	13/07/2008	2.57	580
AUTOMATICO	26/05/2009	1.94	325
AUTOMATICO	05/05/2010	2.09	381
AUTOMATICO	19/09/2011	2.61	598

Tabella 5.9 - Valori massimi annuali di H e di Q per la stazione di Fuentes - Adda per il periodo 1972-2011.

Giorno	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Giorno
1	44.1	70.34	60.29	56.83	112.1	168.8	174.6	89.03	66.78	108.9	205.3	93.74	1
2	52.35	65.39	59.35	54.25	153.5	145.9	169.9	105.7	65.94	85.67	156.1	90.6	2
3	44.28	51.69	51.88	44.99	225.7	137.9	173.1	98.75	71.30	75.91	133	85.01	3
...
...
29	65.68		57.31	99.87	145.4	161.6	104.6	73.39	117.8	78.70	74.38	71.34	29
30	49.51		59.49	108.3	146.0	173.5	87.02	70.05	117.8	79.50	87.54	76.35	30
31	30.23		54.53		166.4		94.81	68.12		90.76		65.21	31

Tabella 5.10 – Portate medie giornaliere per la stazione di Fuentes-Adda per l'anno 2011. In grassetto è riportato il valore massimo mensile.

3.2 Aggiornamento della base dati VAPI-GNDCI per il territorio lombardo

La conoscenza della probabilità di accadimento di un evento di piena è un elemento fondamentale per la progettazione di opere idrauliche, in particolare di quelle rivolte alla mitigazione del rischio alluvionale ed idrogeologico. Ne consegue l'importanza di poter stimare il valore della portata al colmo di piena in base al tempo di ritorno in un qualsiasi punto di un corso d'acqua, indipendentemente dalla presenza o meno di dati di monitoraggio.

L'aggiornamento delle serie storiche di portata descritto nei capitoli precedenti ha permesso di ampliare la base di dati utilizzata per la stima probabilistica delle portate al colmo del Progetto VAPI, Valutazione delle Piene in Italia, che nell'aggiornamento del 2001 per il bacino del Po [6] ha ampliato la base dati pluviometrica al 1986, ma non quella idrologica (livelli e portate), che si riferisce al 1970.

La metodologia VAPI stima le portate al colmo di piena secondo l'equazione:

$$Q_{CT} = Q_i X_T \quad (2)$$

dove:

Q_{CT} è la massima portata al colmo per un determinato periodo di ritorno T, espresso in anni

Q_i è la portata indice, ovvero il valore atteso della massima annuale delle portate al colmo, che è caratteristico della sezione fluviale in esame

X_T è il "fattore di crescita", che dipende dal tempo di ritorno T secondo una legge di probabilità valutata a scala regionale

La procedura VAPI prevede che i valori del fattore di crescita X_T siano stimati a partire dai dati misurati nelle sezioni dotate di idrometri registratori (sezioni strumentate) e siano applicabili anche in punti non dotati di strumenti di monitoraggio (sezioni non strumentate).

Diversamente la portata indice Q_i è calcolata partendo dai dati disponibili nelle sezioni strumentate e deve essere stimata nelle sezioni non strumentate.

La stima delle portate al colmo mediante la procedura VAPI è stata perciò irrobustita dal punto di vista statistico nelle sezioni strumentate ed è stato valutato un metodo di stima mediante simulazione idrologica per le sezioni non strumentate.

3.2.1 Sezioni strumentate

Nel Progetto VAPI la Lombardia ricade interamente in un'area omogenea dal punto di vista idrologico, denominata "Regione A", nella quale il fattore di crescita, X_T è un valore costante per tutti i corsi d'acqua della regione ed è definito per ogni periodo di ritorno T.

Secondo il rapporto VAPI del bacino del Po [6] il fattore di crescita è distribuito secondo una legge di probabilità (Generalized Extreme Value), i cui parametri α , ε , κ sono stati stimati con complessivi 318 anni di dati raccolti su 16 sezioni. L'aggiornamento dei massimi annuali al colmo per le sezioni di progetto, aventi una base dati sufficientemente robusta e omogenea a quella delle sezioni utilizzate per la stima del rapporto VAPI, ha permesso di completare e ampliare la base dati VAPI e di conseguenza irrobustire la stima dei parametri.

In Tabella 5.11 sono riportati i valori dei parametri aggiornati con la nuova base dati VAPI+FLORA, le sezioni utilizzate per la stima e il numero di anni utilizzati, a confronto con quelli originari della VAPI.

Parametri	VAPI89	FLORA2012
α	0.365	0.357
ε	0.745	0.765
κ	-0.110	-0.075
Numero sezioni	16	20
Numero anni-stazione	316	613

Tabella 5.11 – Parametri, sezioni e numero anni dati utilizzati nella VAPI e in FLORA

Per le sezioni strumentate la portata indice Q_i è definita come la media dei massimi annuali al colmo; quando il numero di anni a disposizione è limitato si è utilizzato il metodo “PDS” (Partial Duration Series)[7], proposto anche nel citato rapporto VAPI, che costruisce il campione statistico a partire dalla selezione dei colmi di piena sopra una soglia fissata.

3.2.2 Sezioni non strumentate

Per le sezioni non strumentate si è elaborata una metodologia che, a partire dalle portate indice nelle sezioni strumentate $Q_{i(str)}$, fornisce una stima della portata indice in quelle non strumentate $Q_{i(ns)}$ utilizzando la simulazione idrologico/idraulica per ottenere la portata indice $Q_{i(ns)}$ in una qualsiasi sezione fluviale in base alla sua distanza dalla sorgente.

La simulazione idrologico/idraulica è stata adottata per descrivere compiutamente i meccanismi di formazione e propagazione delle portate di piena lungo tutta l'asta fluviale, sia in ambito montano che in pianura.

Si è deciso di non implementare un nuovo modello ma di utilizzare una parte della catena modellistica FEWS [8-12]: lo strumento operativo per il monitoraggio delle piene fluviali utilizzato dai Centri Funzionali Regionali di Protezione Civile. FEWS modella l'intero bacino del Po ed è stato sviluppato nel triennio 2008-2011 dall'Agenzia Interregionale del Po (AIPO) in collaborazione con le ARPA territorialmente interessate. FEWS funziona sia in previsione che in monitoraggio ed è costantemente alimentato con i dati di monitoraggio in teletrasmissione messi in comune dalle regioni del bacino del Po per fini di protezione civile, attraverso il circuito della “rete fiduciaria”, perciò contiene ogni giorno la base di dati idrologici più ampia disponibile su tutto il bacino. Per il suo sviluppo le regioni Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Liguria, Veneto ed Emilia Romagna hanno messo a disposizione i loro archivi storici di dati da stazioni automatiche.

Il caso di studio presentato è il fiume Adda, affluente sinistro di Po e corso d'acqua significativo in Lombardia, sia per la complessità e le dimensioni del bacino, che copre grossomodo la metà del territorio regionale, sia per le attività antropiche che su di esso insistono.

I risultati delle simulazioni di calibrazione del modello (anni 2000-2009), sono stati utilizzati per definire l'andamento delle portate in piena lungo l'asta del fiume.

Sono state scelte 25 sezioni idrologiche rappresentative (Figura 5.11), selezionate in base ai seguenti criteri:

- presenza di una stazione di monitoraggio idrometrico
- sezione a monte o a valle di una confluenza con altro corso d'acqua
- sezione in ingresso o in uscita dai principali laghi lombardi
- massima distanza tra due sezioni pari a 25 Km



Figura 5.11 – Sezioni idrologiche scelte dal modello FEWS utilizzate per definire l'andamento della $Q_{i(ns)}$ lungo il fiume Adda.

Per ognuna delle 25 sezioni è stata calcolata la portata indice simulata $Q_{i(sim)}$ partendo dai valori di portata in uscita dal modello. Riportando su grafico le portate $Q_{i(sim)}$ in base alla distanza dalla sorgente della rispettiva sezione fluviale si visualizza l'andamento teorico (simulato) delle portate indice $Q_{i(sim)}$ (Figura 5.12 e 5.13). Tra due sezioni consecutive si è assunto un andamento delle portate lineare nello spazio.

I valori simulati forniscono l'informazione sulla propagazione delle portate lungo il corso del fiume ma sono calcolati su 10 anni di simulazione, quindi non possiedono la robustezza delle statistiche osservate nelle sezioni strumentate, con numero di anni superiore a 30.

Per tener conto di questa incertezza nei punti in coincidenza delle sezioni strumentate, sono stati calcolati i

$$R_i = \frac{Q_{i(str)}}{Q_{i(sim)}} \quad (3)$$

rapporti tra la portata indice osservata e quella simulata e la portata indice nelle sezioni non strumentate $Q_{i(ns)}$ si è ottenuta moltiplicando la portata indice simulata per R_i :

$$Q_{i(ns)} = R_i Q_{i(sim)} \quad (4)$$

L'Adda post lacuale può essere diviso in tre tratti, individuati dalle confluenze modellate: uscita dal lago di Como, valle confluenza col fiume Brembo e valle confluenza col fiume Serio. Per ciascun tratto è presente una sezione strumentata in cui può essere calcolata la portata indice $Q_{i(str)}$ ed il rapporto R_i (Tabella 5.12). Il rapporto R_i è assunto costante in ciascuno dei tre tratti (Figura 5.12).

		Sezione	Qi(sim) [mc/s]	Qi(str) [mc/s]	Rapporto	Qi(ns) [mc/s]	Distanza dalla sorgente [Km]
ADDA PRE LACUALE	ALTA VALTELLINA	le prese sondalo	183		0.877	161	20.970
		post roasco	213		0.877	187	33.729
		TIRANO	237	208	0.877	208	43.326
		pre poschiavo	240		0.877	210	44.628
		pre poschiavo bis	243		0.877	213	46.244
	POST POSCHIAVO	post poschiavo	312		0.882	273	46.740
		TEGLIO	333		0.882	292	52.832
		pre mallero	412		0.882	361	73.499
	POST MALLERO	post mallero	494		0.887	438	74.133
		morbegno	590		0.887	523	97.621
FUENTES		639	566.91	0.887	567	111.329	
ADDA POST LACUALE	USCITA LAGO	LAVELLO	476	537	1.130	537	165.388
		adda 171943.56	476		1.130	538	171.944
		paderno d'adda	478		1.130	540	178.440
		adda 185522.09	478		1.130	540	185.522
		pre brembo	460		1.130	520	192.683
	POST BREMBO	post brembo	806		1.367	1102	192.995
		canonica d'adda	806		1.367	1101	193.869
		pre rivolta	790		1.367	1080	200.585
		rivolta d'adda	744		1.367	1017	212.440
		post rivolta	690		1.367	943	222.086
		LODI	654	894	1.367	894	232.310
		boccaserio	612		1.367	836	238.264
		cavenago	598		1.367	818	247.023
		pre serio	586		1.367	801	257.441
	POST SERIO	post serio	707		1.322	935	257.990
		adda 268756.56	699		1.322	925	268.757
		PIZZIGHETTONE	691	914	1.322	914	279.321
		adda 286741.47	690		1.322	913	286.741
		pre Po	694		1.322	917	293.882

Tabella 5.12 – Valori della portata indice Q_i (mc/s) rispetto alla distanza dalla sorgente (Km) nei 25 punti di simulazione del Fiume Adda.

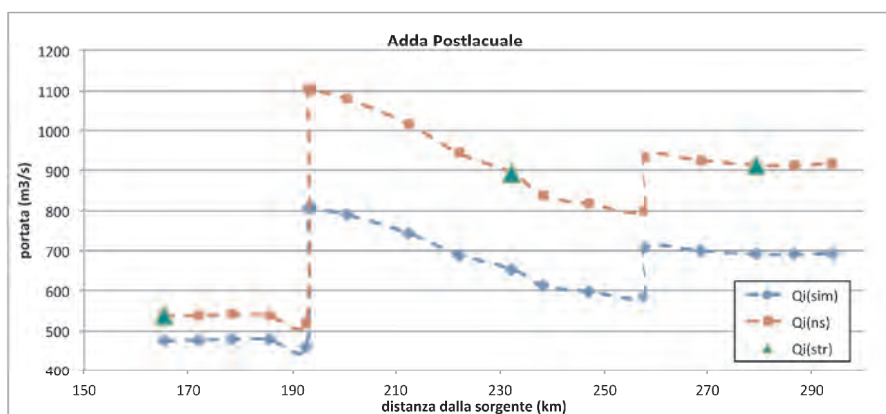


Figura 5.12 - Adda post-lacuale: andamento delle portate indice simulate $Q_{i(sim)}$, in sezioni strumentate $Q_{i(str)}$ e non strumentate $Q_{i(ns)}$.

Anche l'Adda prelacuale può essere diviso in tre tratti, individuati dalle confluenze modellate: alta Valtellina, valle confluente col torrente Poschiavino e valle confluente col torrente Mallero. In questo caso però sono disponibili dati solo in due sezioni strumentate: Tirano e Fuentes (Tabella 5.12), appartenenti rispettivamente al primo ed al terzo tratto. Data la modesta differenza tra i due rapporti, nel secondo tratto (valle Poschiavino) è stato assunto un rapporto pari alla media dei due (Tabella 5.12 e Figura 5.13). ARPA Lombardia ha previsto per il 2012 l'installazione di una stazione idrometrica a Teglio all'interno del secondo tratto, così da completare ed irrobustire la stima delle portate lungo l'Adda prelacuale.

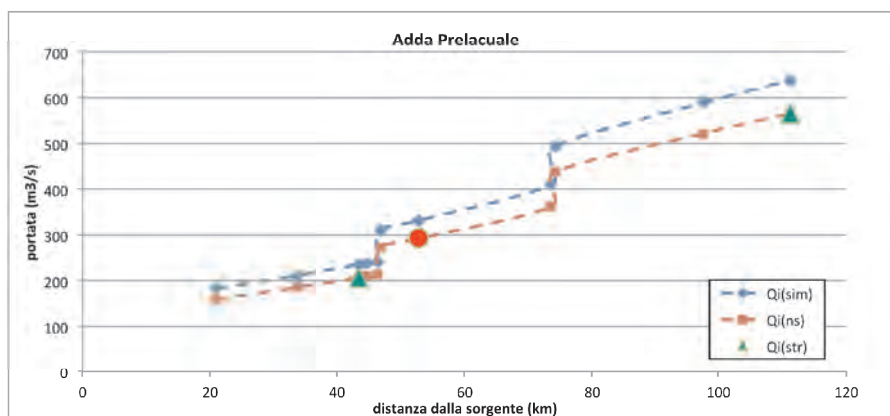


Figura 5.13 – Adda pre-lacuale: andamento delle portate indice simulate $Q_{i(sim)}$, in sezioni strumentate $Q_{i(str)}$ e non strumentate $Q_{i(ns)}$. In rosso la stazione in fase d'installazione a Teglio.

4. PUBBLICAZIONE ONLINE

I dati e le statistiche elaborate durante il progetto, nell'ottica "di fornire informazioni corrette, puntuali e sempre aggiornate nonché di erogare servizi sempre più fruibili a cittadini e imprese" [13], sono stati pubblicati online. Attraverso il progetto FLORA il Servizio Idrografico di Arpa Lombardia ha aggiornato e messo su web un portale idrologico cartografico (WebGis Idrologico - http://idro.arpalombardia.it/pmapper-3.2/wg_serv_idro.phtml, Figura 5.14) dove si rendono disponibili al pubblico tutti i dati e le elaborazioni di interesse idrologico raccolti da ARPA Lombardia.

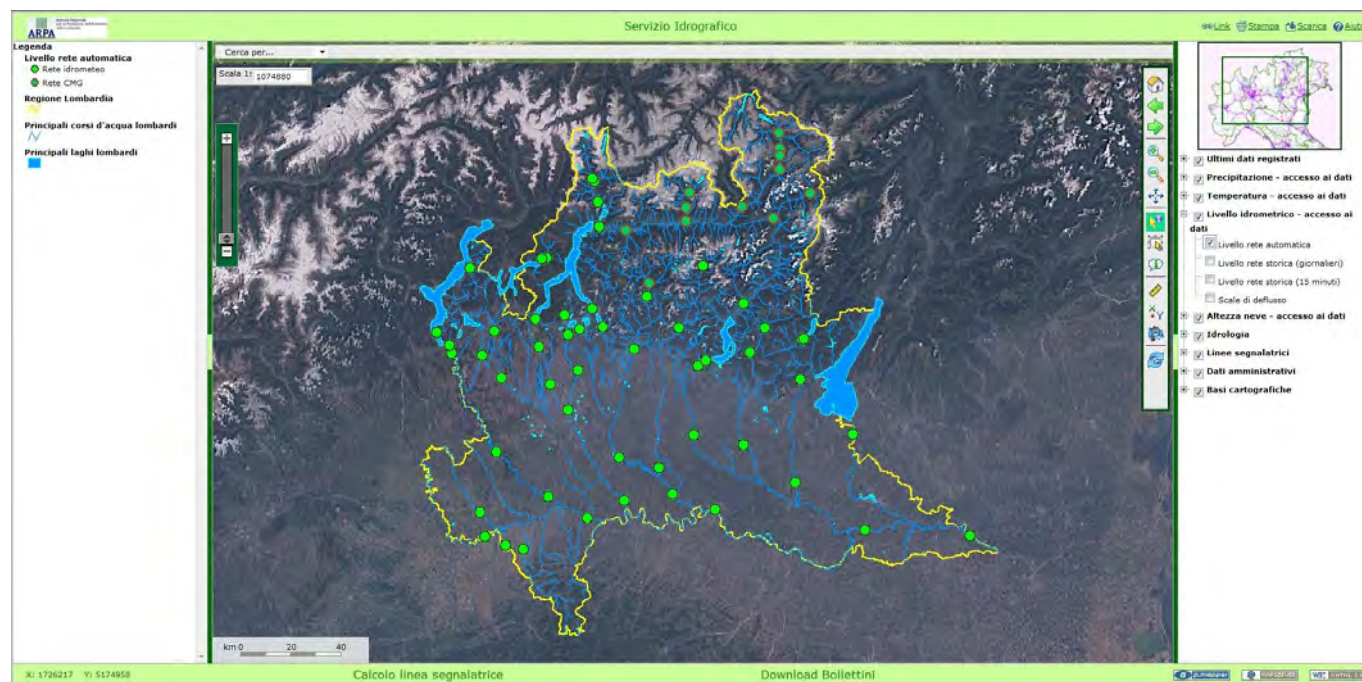


Figura 5.14 – Web-Gis Idrologico di Arpa Lombardia.

Oltre ai risultati di progetto sullo stesso portale sono a disposizione del pubblico, ad accesso libero e gratuito, i dati in tempo reale e storici di precipitazione, altezza della neve, temperatura, livello idrometrico e scale di portata. Tutte le informazioni sono consultabili e immediatamente scaricabili online. Sono, inoltre, disponibili elaborazioni di carattere idrologico come le Linee di Possibilità Pluviometrica (LSPP) a base oraria (1-24h) e giornaliera (1-5g), i valori di CN-II (Curve Number–metodo SCS-CN) e di S2 (massimo potenziale di ritenzione del suolo), per tutto il territorio della Valtellina e della Valle del Mera, e il modello digitale del terreno (DTM) del Bacino dell'Adda pre-lacuale, comprendente anche le aree ricadenti in territorio svizzero [14].

CONCLUSIONI

Gli obiettivi gestionali raggiunti nel contesto del progetto sono molteplici e permettono al monitoraggio delle portate in Lombardia di superare un gap generazionale che durava da 40 anni. Dal 1970 al 2011 infatti l'idrologia del territorio lombardo si è sfilacciata, da una parte per via di continui passaggi di competenze (dal Compartimento di Milano al Compartimento di Parma del Servizio Idrografico statale, poi alla Protezione Civile della Regione Lombardia ed infine dal 2004 ad Arpa Lombardia), con una conseguente frammentazione dei compiti e senza che mai ci fosse la definizione organica della gestione dei dati e della rete, dall'altra per via dell'esecuzione in diversi passaggi, pure non strutturati, dell'integrazione e svecchiamento delle reti di monitoraggio.

Questo ha generato un sistema disorganizzato e frammentato in termini di dati, competenze e sistemi di monitoraggio che ARPA Lombardia negli ultimi 8 anni ha cercato su più fronti di ristrutturare e potenziare: nel 2005 ha riorganizzato l'archivio cartaceo storico dei dati, nel 2007 ha integrato tutti i diversi archivi di dati digitali in un'unica banca dati idrologica, nel 2006 ha acquisito la strumentazione e dal 2007 ha internalizzato tutte le attività di esecuzione delle misure di portata e delle scale di deflusso, infine nel triennio 2010-2012 sta portando a compimento un progetto organico di ristrutturazione della rete di monitoraggio in teletrasmissione, che adegua tutte le stazioni esistenti allo stesso standard di raccolta dati e di teletrasmissione, dismette le stazioni valutate non necessarie e installa nuovi punti di monitoraggio.

In questo contesto si sono inserite le attività del progetto FLORA, in particolare si sono realizzate le seguenti attività strategiche:

- valutazione critica della rete di monitoraggio idrologica, del significato idrologico di ogni sezione strumentata, delle caratteristiche idrauliche e della continuità con il monitoraggio storico;
- realizzazione di un progetto di miglioramento del monitoraggio idrologico regionale, valutando quali sezioni rilevanti non ancora strumentate necessitino di essere monitorate e quali soluzioni operative siano perseguibili laddove gli strumenti tradizionali non sono sufficienti;
- raccordo del monitoraggio storico con quello attuale mediante il recupero e la stabilizzazione dei dati idrologici dagli anni '70 ad oggi;
- sviluppo di una metodologia operativa per la valutazione delle portate di piena in sezioni non strumentate mediante l'utilizzo di simulazioni idrologico-idrauliche;
- pubblicazione dei dati e delle elaborazioni sul web con la creazione di un servizio di consultazione di dati idrologici sul sito istituzionale di ARPA Lombardia, consultabile liberamente e gratuitamente dal pubblico.

In definitiva, si sono poste le basi per proseguire in modo organico e strutturato le attività di monitoraggio idrologico, non soltanto per le piene fluviali ma anche per i bilanci idrologici e, per continuare a svolgere le attività istituzionali con un bagaglio informativo, strumentale e tecnico adeguato.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano per la collaborazione tutte le persone che, al di là del proprio ruolo istituzionale, hanno collaborato personalmente alla riuscita del progetto, in particolare il Direttore del Consorzio dell'Adda Luigi Bertoli, per il costante confronto e scambio di dati e informazioni, l'ing. Alberto Agnetti di ARPA Emilia Romagna e l'Ing. Laura Casicci di AIPo per il supporto sul modello FEWS, l'ing. Piero Tabellini dell'Autorità di bacino del fiume Po per le elaborazioni messe a disposizione, il dott. Gianfranco Pietroboni e l'ing. Luca Mondinelli del Consorzio del Chiese di II grado, il sig. Patrizio Girardi di AIPo, guardiano della diga di Salionze.

BIBLIOGRAFIA

Servizio Idrografico, "Dati caratteristici dei corsi d'acqua italiani", Pubblicazione 17 del Servizio, Quinta edizione aggiornata all'anno 1970;

Ufficio Idrografico per gli studi del bacino del PO, "Portate e Bilanci Idrologici", edizione aggiornata all'anno 1950;

ARPA della Lombardia, "Webgis idrologico" (http://idro.arpalombardia.it/pmapper-3.2/wg_serv_idro.phtml);

"Manual on Stream Gauging Volume I e II" WMO-No. 1044, 2010 (http://www.nws.noaa.gov/os/water/RFC_support/resources/WMO_Manual_on_Stream_Gauging_-_Field_Work_1044_Vol_I_en.pdf, http://www.nws.noaa.gov/os/water/RFC_support/resources/WMO_Manual_on_Stream_Gauging_-_Computation_of_Discharge_1044_Vol_II_en.pdf);

ISO 1100/2 Annex A, "Liquid flow in open channels - Part 2: Determination of the stage-discharge relation";

De Michele e R. Rosso - Progetto CNR-GNDCI VAPI-Valutazione delle piene in Italia. Rapporto sulla valutazione delle piene-Italia Nord Occidentale. Portata al Colmo di Piena-Bacino del Fiume Po e Liguria Tirrenica. 2001. (<http://www.idrologia.polito.it/gndci/rapporti/ToMiGe.htm>);

Rosso R, "Manuale di Protezione Idraulica del Territorio" CUSL 2002;

Reggiani P., S. Pecora, M. Vergnani. "Flood and Drought Warning for Po River. FEWS User Day, 18-19 October 2007". ([https://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/8684133/day+2+-+01+Flood+and+Drought+Warning+for+Po+River+in+Italy+\(Reggiani\).pdf?version=1&modificationDate=1197542303000](https://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/8684133/day+2+-+01+Flood+and+Drought+Warning+for+Po+River+in+Italy+(Reggiani).pdf?version=1&modificationDate=1197542303000));

Rebora N., M. Vergnani e L. Casicci. "Prevedere e prevenire le piene del fiume Po linee guida per l'utilizzo del sistema modellistico per la previsione delle piene del Po". QUIPO 2012 N.1 Insetto tecnico pagg 1-4 (http://www.agenziapo.it/quipo/dwd/2012/QUIPO-WEB_1_2012.pdf);

AA. VV. "Monitoraggio e modellistica preventivi ed in corso d'opera: il caso del Po" DHI SOFTWARE USER CONFERENCE 10 - 11 ottobre 2007 (http://www.intecno-dhi.it/doc/userconference/Progetto_Po.pdf);

AA. VV. "Prevedere e prevenire le piene del fiume Po - Linee guida per la previsione e il controllo delle piene fluviali dell'asta principale del fiume Po" (http://www.cimafoundation.org/archive/documents/interno_PIENE_fiume_Po.pdf);

Deltares, "Flood Forecasting System River Po, Italy". (<http://www.deltares.nl/en/project/101490/flood-forecasting-system-river-po-italy/873016>);

Direttiva 26/11/2009, n°8, del Ministero per la Pubblica Amministrazione e l'Innovazione;

R. Rosso, "Shakeup -2 Valutazione della portata al colmo di piena e degli idrogrammi di riferimento. Relazione finale", Luglio 2007.



Repubblica e Cantone Ticino
Dipartimento del territorio

Progetto cofinanziato dal FESR «Fondo europeo di sviluppo regionale»
«Le opportunità non hanno confini»

