

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.A 2021/2022

**Impiego di relazioni adattive nel tempo e nello spazio per la
ricostruzione di campi di precipitazione**



Relatore: Prof. Pierluigi Claps

Candidato: Chiara Carlotta Argentino

Correlatore: Ing. Paola Mazzoglio

29 marzo 2022

Indice

1. Il rischio idrogeologico in Italia.....	1
1.2. Il ruolo del radar meteorologico nella previsione del rischio idrogeologico.....	3
1.2.1 Rete di monitoraggio nazionale	4
1.2.1.2 Rete radar nazionale (RRN)	5
2: Stima della precipitazione tramite l'utilizzo del radar	9
2.1 Relazione tra riflettività ed intensità di pioggia.....	9
2.2 Metodologie non adattive	11
2.3 Metodologie adattive	12
2.3.1 Alfieri et al. (2010)	12
2.3.2. Progetto FLORA (2012)	15
2.3.3. Tecnica adattiva nello spazio e nel tempo (ATS) (2015)	18
3: Evento alluvionale 19-24 ottobre 2019 nel basso Alessandrino	21
3.1 Analisi metereologica	22
Prima fase dell'evento.....	23
Seconda fase.....	26
3.2 Maggiori conseguenze sul territorio	28
4. Applicazione tecnica adattiva nello spazio e nel tempo (ATS)	30
4.1 Dati disponibili e trattamento dati	31
4.2 Definizione di area di interesse e dell'intervallo temporale selezionato	33
4.3 Funzionamento del metodo	34
4.4. Realizzazione dei campi di precipitazione	38
4.4.1 Valutazione dei coefficienti a e b.....	39
4.4.1.1 Valutazione dei coefficienti a e b nelle stazioni più significative.....	40
Stazione di Gavi (AL)	43
Stazione di Arquata Scrivia (AL).....	44
Stazione di Lavagnina Lago (AL).....	45

Stazione di Rossiglione (GE)	46
4.4.1.2. Valutazione complessiva delle coppie a e b.....	47
4.4.2 Interpolazione spaziale dei coefficienti a e b adoperando l’algoritmo IDW	49
4.4.3 Realizzazione dei campi di pioggia	50
4.5. Risultati.....	51
5. Conclusioni.....	60
ALLEGATO I: Il radar meteorologico	63
Funzionamento e specifiche	64
Misure ottenute dal radar.....	65
Prodotti	67
Fattori e incertezze nella stima da radar	69
I.I Il contesto piemontese	71
ALLEGATO II: Mappe coefficienti	73
ALLEGATO III: Interpolazione dei coefficienti	79
Bibliografia.....	85
Sitografia	86
Ringraziamenti	87

Indice figure

Figura 1 Rete Radar Nazionale (in rosso i radar non operativi al momento del download dei dati) (Fonte – Protezione Civile).....	7
Figura 2 Esempi di relazioni non adattive in letteratura (Fonte: NOAA).....	11
Figura 3 Area interessata dallo studio di Alfieri et al. (2010) (Fonte: Alfieri et al.(2010)) ...	12
Figura 4 Finestra di calibrazione temporale secondo la metodologia di Alfieri (2010) (Fonte: Alfieri et al. (2010))	13
Figura 5 Zona di accettazione del fascio radar in base agli errori relativi di stazione. (Fonte: Report FLORA, 2012).....	16
Figura 6 Stazioni comprese nel raggio di 125 km dal radar Bric della Croce (Fonte: Report FLORA,2012)	17
Figura 7 Rappresentazione del dominio temporale di stima (Fonte: Libertino et al. (2015))..	19
Figura 8 Precipitazioni osservate nella giornata di domenica 20 ottobre 2019 (Fonte: Arpa Piemonte)	24
Figura 9 Formazione e traslazione in direzione est del MSC osservato dal satellite Meteosat (EUMETSAT) alle ore 00:00 UTC, 3:00 UTC, 6:00 UTC. (Fonte: Arpa Piemonte).....	24
Figura 10 Immagine Meteosat raffigurante la forma a V del sistema convettivo presente sull'Alessandrino alle ore 15:00 UTC del 21 ottobre (Fonte: Arpa Piemonte)	25
Figura 11 Precipitazioni cumulate in 12 ore il giorno 22 ottobre in Piemonte (Fonte: Arpa Piemonte)	26
Figura 12 Precipitazioni misurate il giorno 23 ottobre (Fonte: Arpa Piemonte)	27
Figura 13 Precipitazioni misurate il giorno 24 ottobre. (Fonte: Arpa Piemonte)	27
Figura 14 Guado sul Torrente Lemme a Gavi. (Fonte: Arpa Piemonte).....	29
Figura 15 Strada comunale di Gavi ricoperta da materiale franato (Fonte:Arpa Piemonte)....	29
Figura 16 Danni al tetto dell'Oratorio dei Turchini causati da frane superficiali del versante (Fonte: Arpa Piemonte).....	29
Figura 17 Rete di stazioni pluviometriche piemontese (Fonte: Arpa Piemonte)	31
Figura 18 Esempio di prodotto SRI ore 16:40	32
Figura 19 Rappresentazione delle cumulate nei 5 giorni dell'evento (Fonte: Arpa Piemonte)	33
Figura 20 Precipitazione cumulata nelle 24 ore del giorno 21 ottobre (Fonte: Arpa Piemonte)	40
Figura 21 Totali di pioggia nelle stazioni più significative (Fonte: Arpa Piemonte).....	41

Figura 22 Ietogramma della stazione di Gavi (AL) e linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per la determinazione del tempo di ritorno del fenomeno. (Fonte: Arpa Piemonte)	43
Figura 23 Andamento temporale dei coefficienti a e b nella stazione di Gavi (AL)	43
Figura 24 Ietogramma della stazione di Arquata Scrivia (AL) e linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per la determinazione del tempo di ritorno del fenomeno. (Fonte: Arpa Piemonte)	44
Figura 25 Andamento temporale dei coefficienti a e b nella stazione di Arquata Scrivia (AL)	44
Figura 26 Ietogramma della stazione di Lavagnina Lago (AL) e linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per la determinazione del tempo di ritorno del fenomeno. (Fonte: Arpa Piemonte)	45
Figura 27 Andamento temporale dei coefficienti a e b nella stazione di Lavagnina Lago (AL)	45
Figura 28 Ietogramma della stazione di Rossiglione (GE) e linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per la determinazione del tempo di ritorno del fenomeno. (Fonte: Arpa Piemonte)	46
Figura 29 Andamento temporale dei coefficienti a e b nella stazione di Rossiglione (GE)	46
Figura 30 Rappresentazione nel piano(a,b) dei coefficienti nelle sei ore dell'evento per ogni stazione pluviometrica in esame	48
Figura 31 Confronto tra i valori osservati e stimati da radar per il caso in esame	53
Figura 32 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 15:00	54
Figura 33 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 16:00	55
Figura 34 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 17:00	56
Figura 35 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 18:00	57
Figura 36 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 19:00	58
Figura 37 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 20:00	59

Indice figure allegati

Figura AI 1 Invio e retro-diffusione del segnale radar (Fonte: University of Oklahoma).....	64
Figura AI 2 PPI (Plan Position Indicator) (Fonte: Principi di funzionamento- misure e prodotti)	67
Figura AI 3 RHI (Range Height Indicator) (Fonte: Principi di funzionamento- misure e prodotti).....	67
Figura AI 4 CAPPI (Costant Altitude Plan Position Indicator (Fonte: Principi di funzionamento- misure e prodotti).....	68
Figura AI 5 Radar Bric della Croce (Fonte: Arpa Piemonte)	71
Figura AI 6 Radar di Monte Settepani (Fonte: Arpa Piemonte)	72
Figura AII 1 Mappe coefficienti a, b – Ore 15:00.....	73
Figura AII 2 Mappe coefficienti a, b – Ore 16:00.....	74
Figura AII 3 Mappe coefficienti a, b – Ore 17:00.....	75
Figura AII 4 Mappe coefficienti a, b – Ore 18:00.....	76
Figura AII 5 Mappe coefficienti a, b – Ore 19:00.....	77
Figura AII 6 Mappe coefficienti a, b – Ore 20:00.....	78
Figura AIII 1 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 15:00	79
Figura AIII 2 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 16:00	80
Figura AIII 3 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 17:00	81
Figura AIII 4 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 18:00	82
Figura AIII 5 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 19:00	83
Figura AIII 6 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 20:00	84

Indice tabelle

Tabella 1 Elenco di Radar metereologici (Fonte: Protezione Civile - aggiornato al 31/7/2016)7	
Tabella 2 Elenco di stazioni pluviometriche escluse dal metodo ATS	35
Tabella 3 Valori di riflettività soglia per le sei ore in esame	36
Tabella 4 Caratteristiche radar di Bric della Croce (Fonte: Arpa Piemonte).....	71
Tabella 5 Caratteristiche radar di Monte Settepani (Fonte: Arpa Piemonte).....	72

Introduzione

La natura dei fenomeni metereologici sta subendo continue modifiche negli ultimi anni, registrando una diminuzione delle precipitazioni totali e dei giorni piovosi, con una opposta crescita nell'intensità, concentrata in brevi intervalli temporali. Di conseguenza, i bacini risultano sollecitati dagli eventi meteorologici con un relativo aumento delle conseguenze al suolo, che continuano ad indebolire il territorio italiano.

Nel tentativo di adeguarsi a questo cambiamento, la concezione della difesa del territorio si sta indirizzando sulla prevenzione e sulla gestione del rischio, con lo scopo di stimare le precipitazioni e le portate con sufficiente anticipo.

La comunità scientifica attualmente vede protagonista, nella creazione di nuovi modelli idrologici di prevenzione, l'uso combinato del radarmeteorologico e della rete di pluviometri. Il passaggio che intercorre tra i dati puntuali al campo spaziale delle precipitazioni continua ad essere, però, oggetto di discussione. Infatti, le tecniche interpolative esistenti per i soli dati pluviometrici non forniscono un'accurata e corretta informazione sulla variabilità spaziale delle precipitazioni a causa del ridotto numero di punti per i quali sono disponibili delle misure. Dunque, la coniugazione dei due strumenti rappresenta tuttora un argomento fortemente dibattuto in letteratura, dove sono proposti diversi approcci.

In questo contesto si introduce il seguente lavoro di tesi, il cui scopo è di duplice entità: sondare il funzionamento della "Tecnica adattiva nello spazio e nel tempo (ATS)" di Libertino et al. (2015) nel caso di evento convettivo estremo e, successivamente, adoperando i risultati forniti, ricostruire i campi di pioggia. Nell'analisi sono utilizzati in maniera combinata i dati provenienti dalla rete pluviometrica di Arpa Piemonte ed i prodotti radar SRI (*Surface Rainfall Intensity*) forniti dal Dipartimento della Protezione Civile, riferiti all'evento alluvionale avvenuto nell'ottobre 2019 nel Basso Alessandrino.

Successivamente si è proceduto alla riproduzione dei campi di pioggia grazie agli output puntuali ricavati dal metodo, in modo da ottenere le stime areali delle precipitazioni nelle sei ore del giorno in cui l'evento ha avuto il suo picco di intensità.

È stato possibile così capire la funzionalità della tecnica adattiva nella calibrazione dei coefficienti che intercorrono tra la riflettività e le precipitazioni, sia nel tempo sia nello spazio. Infine, con la creazione dei campi di pioggia è stato possibile ricavare, per ogni punto dello spazio e per ogni ora, un valore di precipitazione stimata dalla combinazione dei due strumenti.

1. Il rischio idrogeologico in Italia

I fenomeni metereologici negli ultimi anni hanno subito delle modifiche a causa di diversi fattori, tra cui i cambiamenti climatici. In particolar modo si sono osservati forti aumenti di intensità, concentrati in brevi intervalli temporali, che attualmente stanno contribuendo a rendere sempre più vulnerabile il territorio italiano, già intrinsecamente sensibile ai fenomeni idrogeologici.

Il nostro territorio è particolarmente predisposto a fenomeni di dissesto, a causa di una combinazione di fattori geologici ed idrologici: la conformazione orografica complessa, unita alla presenza di bacini di piccole dimensioni, genera effetti istantanei. Infatti, il verificarsi di eventi localizzati ed intensi in bacini con bassi tempi di risposta alle precipitazioni origina una concentrazione di acqua notevole in breve tempo e su aree limitate, generando scrosci straordinariamente violenti che si presentano irregolarmente ed in maniera discontinua. Si provocano, così, conseguenze immediate ed impattanti sul territorio con problemi inerenti sia alla stabilità dei versanti sia all'ingrossamento dei corsi d'acqua, a volte raggiungendo lo stato di piena celermente.

Oltre ai fattori di tipo naturale, sono di pari importanza i fattori provenienti dall'azione dell'uomo, come il disboscamento aggressivo, le politiche agricole non tutelanti l'ambiente, l'abusivismo edilizio, l'abbandono dei terreni montani che concorrono all'indebolimento del territorio. In più, ad aggravare la situazione ed aumentare l'esposizione ai fenomeni di dissesto, contribuiscono un'elevata antropizzazione, l'impermeabilizzazione del territorio ed una scarsa manutenzione degli alvei che direzionano l'acqua, proveniente dalle piogge, verso altri punti in cui il deflusso ordinario è già impedito.

Le alluvioni generano spesso vittime e danni ecologici che possono compromettere lo sviluppo economico delle regioni colpite. Per ridurre le conseguenze di questi eventi è possibile effettuare:

- interventi strutturali, quali argini, canali scolmatori, invasi di ritenuta;
- interventi non strutturali, come la generazione di un sistema di allertamento, la stesura dei piani di emergenza e la coordinazione delle loro attività.

Negli ultimi anni è incrementata la frequenza di accadimento di episodi di dissesto idrogeologico che hanno avuto un forte impatto sulla popolazione, causando morti e danni ingenti ai beni, anche artistici. Vista questa situazione e lo sviluppo continuo di nuove tecnologie è stato necessario spostare la politica verso un'ottica non più orientata sulla riparazione, economica e strutturale, ma indirizzata sulla previsione e prevenzione, in modo da individuare i fattori di rischio ed intervenendo per ridurlo.

Sono stati sviluppati, allora, diversi procedimenti quali l'identificazione delle aree a rischio, la pianificazione comunale di protezione civile ed i sistemi di allertamento e sorveglianza degli eventi. Per questi ultimi, in particolar modo, è necessario possedere modelli di previsione connessi ad una rete di monitoraggio, così da avvisare con anticipo gli organi territoriali istituzionali e limitare l'esposizione delle persone e i danni al territorio, attraverso misure di prevenzione in tempo reale.

Nell'ottica di monitoraggio continuo delle condizioni atmosferiche e di preannuncio di possibili eventi alluvionali, l'uso combinato del radar con i pluviometri permette di coniugare l'informazione spaziale con quella puntiforme, non rappresentativa del bacino idrografico. In questo modo è possibile una valutazione più precisa su di un'area più vasta della precipitazione, arrivando ad una gestione idrica più soddisfacente.

1.2. Il ruolo del radar meteorologico nella previsione del rischio idrogeologico

Uno strumento radar, analizzando le differenze tra un segnale emesso da un trasmettitore e il segnale di ritorno retro-diffuso dal bersaglio, permette l'individuazione del sito di un oggetto. Il radar meteorologico è uno strumento di *remote-sensing* di elevata tecnologia, adoperato attualmente dal Servizio Meteorologico, che permette di studiare, tramite emissione e ricezione di onde elettromagnetiche, un'ampia regione di atmosfera, elaborando una discreta gamma di prodotti (nel caso della rete italiana vengono prodotti dati con risoluzione 1 km).

Il funzionamento del radar nel rilevamento e nella caratterizzazione delle idrometeore può essere riassunto principalmente in tre fasi:

- generazione, tramite un trasmettitore, di un fascio di onde elettromagnetiche ad elevata potenza, focalizzato da un'antenna e trasmesso nell'atmosfera;
- intercettazione delle idrometeore che diffondono l'energia da cui sono investite e ne retro diffondono una quota in direzione del radar;
- ricezione del segnale di ritorno dell'antenna e relativa elaborazione ad opera del ricevitore, da cui si ricavano diverse informazioni. In particolare, il segnale di ritorno fornisce una stima dell'intensità di precipitazione, il suo tempo impiegato nel tragitto consente di individuare le idrometeore in termini di direzione e distanza e le sue variazioni di fase permettono di stimare la velocità di spostamento del fenomeno meteorologico.

Il processo descritto viene reiterato variando, in prefissati intervalli temporali, la direzione di puntamento dell'antenna, identificata dall'angolo di azimut ϕ e dall'angolo di elevazione θ .

Per ulteriori approfondimenti si consiglia di consultare l'allegato I.

Le caratteristiche del radar lo rendono estremamente versatile e ricco di diverse funzionalità:

- presenta un'elevata copertura spaziale;
- dispone di una complementarità con altri sensori;
- è indipendente dalle fonti luminose e dalla emissività del bersaglio;
- non disturba l'idrometeora osservata;
- le misurazioni sono riferite al volume tridimensionale intercettato;
- offre i dati in tempo reale;

- minimizza il problema del campionamento temporale grazie alle sue misure ad intervalli regolari, consentendo il calcolo della precipitazione cumulata;

Nell'ambito idrologico e meteorologico il radar ha un ruolo principe nelle attività di monitoraggio e di previsione a breve termine (fino a tre ore). Infatti, possiede diversi vantaggi, tra cui la possibilità di prevedere i fenomeni temporaleschi con la relativa celerità di traslazione dei fronti nuvolosi, di valutare su vaste aree le precipitazioni, utilizzando in contemporanea i dati derivanti dal monitoraggio al suolo, e di migliorare la ricostruzione dei campi di precipitazione.

1.2.1 Rete di monitoraggio nazionale

Le attività di previsione, monitoraggio e sorveglianza in tempo reale dei fenomeni meteorologici, per comprendere gli effetti sulla popolazione e sui beni di un territorio, sono effettuate dalla rete dei Centri funzionali. In particolare, questa è costituita dal Centro Funzionale Centrale, presso il Dipartimento della Protezione civile e dai Centri funzionali decentrati presso le Regioni e le Province autonome. I centri funzionali, con il Dipartimento della Protezione civile e le Regioni, gestiscono il Sistema di allertamento italiano.

Le attività di ogni centro funzionale comprendono la raccolta e la condivisione dei dati provenienti sia da sensori disposti in tutta Italia sia da diverse piattaforme, quali:

- le misurazioni delle reti meteo-idro-pluviometriche, dei radar e dei satelliti meteorologici;
- i dati idrologici e geologici provenienti dai vari territori e quelli inerenti al monitoraggio delle frane;
- i modelli idraulici, idrogeologici e meteorologici.

In questo modo i Centri funzionali generano probabili situazioni, coniugando ulteriori modellazioni degli effetti sul territorio, emettendo bollettini ed avvisi inerenti all'evoluzione dei fenomeni e delle criticità possibili sul territorio.

Il coordinatore della rete dei Centri funzionali è il Centro Funzionale Centrale il cui compito è la gestione dell'organizzazione e del sistema di allerta nazionale e regionale in ambito di rischio idrogeologico ed idraulico.

Con sede a Roma nella sede operativa del Dipartimento della Protezione Civile, ha come incarico la generazione di scenari di rischio e la valutazione delle conseguenze sulla popolazione, sui beni e sull'ambiente di una zona in analisi, grazie ad una costante valutazione del monitoraggio degli eventi e degli effetti sul territorio. Ogni giorno produce il Bollettino di Vigilanza Meteorologica Nazionale dove vengono elaborati i parametri meteorologici e le zone in cui questi oltrepassano delle soglie di allarme prefissate. In caso di eventi che coinvolgono più regioni vengono emessi Avvisi meteo nazionali.

Inoltre, valuta il probabile verificarsi o la possibile evoluzione di fenomeni alluvionali o franosi causati dagli eventi precipitativi previsti. Questi vengono raccolti in un Bollettino di criticità a disposizione dei Centri Funzionali Decentrati delle Regioni e delle strutture operative dei ministeri.

Infine, può assumere lo svolgimento delle attività dei centri funzionali regionali in caso di necessità o richiesta, secondo il principio di sussidiarietà.

1.2.1.2 Rete radar nazionale (RRN)

La rete di monitoraggio nazionale è stata realizzata dal Dipartimento della Protezione Civile con lo scopo di monitorare i fenomeni atmosferici agenti sul territorio italiano, grazie ad un'analisi integrata di dati provenienti da strumentazioni di tipologie differenti. In particolare, il Centro Funzionale Centrale, in collaborazione con le strutture dislocate sui territori, integra:

- i dati provenienti dai satelliti meteorologici, utili a captare informazioni sulla copertura nuvolosa;
- le misurazioni puntuali delle stazioni meteo-idro-pluviometriche al suolo. Effettuano in maniera continua un campionamento dei dati compreso tra un minuto ed un'ora con un "tempo di latenza", ovvero l'intervallo temporale tra l'istante di misura e la possibilità di uso all'operatore, di circa 30 minuti. I rilevamenti vengono inviati alla centrale di monitoraggio di ogni centro funzionale che li processa e li inserisce in una rete di dati disponibile ad altri Centri Funzionali.

In particolare, le strumentazioni di telemisura sono composte da:

- pluviometri (atti alla registrazione della pioggia caduta a terra);
 - idrometri (permettono la rilevazione del livello dei fiumi),
 - termometri (misurano la temperatura);
 - anemometri (registrano l'intensità del vento);
 - nivometri (misurano la neve al suolo).
- le osservazioni radar in tempo reale, che permettono la valutazione della presenza e intensità di precipitazione.

Il radar, essendo uno strumento di elevata tecnologia, è soggetto a diverse fonti di errore:

- a causa della presenza di ostacoli artificiali, rilievi e, in certi casi dal suolo, il fascio radar viene riflesso da cause non correlabili alla precipitazione;
- il fascio del radar non riesce a proseguire oltre una certa quota, per via di un ostacolo orografico, non intercettando la precipitazione presente oltre il rilievo;
- le misurazioni effettuate da radar, essendo profondamente variabili nello spazio e nel tempo, possono non essere perfettamente aderenti alla realtà, ma risultare solo come stime;
- l'unione dei fattori topografici e della curvatura della superficie terrestre originano una propagazione non orizzontale del fascio, causando un aumento dell'altitudine del volume atmosferico intercettato, con l'incremento della distanza dal radar. Dunque, vista anche la variabilità delle nubi sull'asse verticale, l'osservazione in quota può non essere coerente con ciò che si verifica al suolo;
- mancato funzionamento in alcuni intervalli temporali a seguito di interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria dello strumento.

Una parziale limitazione di queste problematiche è la realizzazione di un processo di mosaicatura dei radar dislocati sul territorio nazionale, da parte del Centro Funzionale Centrale, con l'ulteriore vantaggio di poter usufruire di un organismo interconnesso in tempo reale.

È stato, così, realizzato un sistema articolato in modo da ottenere, ogni 15 minuti circa, un prodotto coprente il territorio nazionale il più possibile: i dati provenienti dagli Enti partecipanti alla rete vengono uniti e inviati ai Centri Funzionali Decentrati e agli Enti Istituzionali nazionali.

La Rete Radar Nazionale è composta da 24 radar operativi, descritti in tabella 1, il cui posizionamento geografico è visibile in figura 1:

Tabella 1 Elenco di Radar metereologici (Fonte: Protezione Civile - aggiornato al 31/7/2016)

Radar del Dipartimento della Protezione Civile operativi	Radar regionali	Radar dell'Aeronautica militare	Radar dell'Enav
Monte Crocione (LU)	Bric della Croce (TO)	Brindisi	Linate (MI)
Monte Pettinascura (CS)	Settepani (SV)	San Giusto (PI)	Fiumicino (RM)
Monte Serano (PG)	Gattatico (RE)	Grazzanise (CE)	
Monte Il Monte (CH)	S. Pietro Capofiume (BO)	Decimomannu (CA)	
Monte Zoufplan (UD)	Monte Grande (PD)		
Monte Lauro (SR)	Concordia Sagittaria (VE)		
Aeroporto dello Stretto (RC)	Monte Macaion (BZ)		
Aeroporto di Fontanarossa (CT)	Fossalon (GO)		
	Monte Rasu (SS)		
	Monte Midia (AQ)		

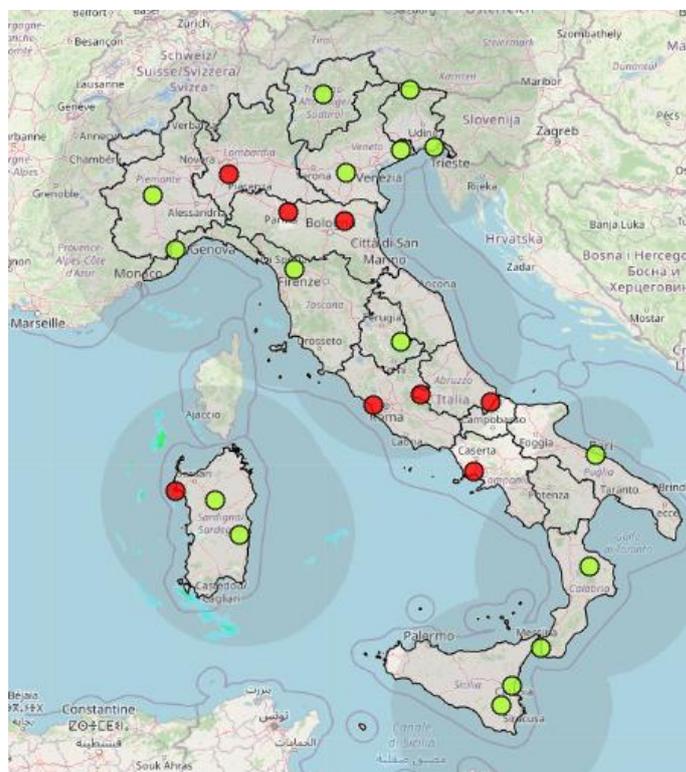


Figura 1 Rete Radar Nazionale (in rosso i radar non operativi al momento del download dei dati) (Fonte – Protezione Civile)

I prodotti ottenuti dall'utilizzo della rete radar nazionale e la frequenza con cui possono essere fruibili ai centri funzionali decentrati e agli enti nazionali sono:

- *CAPPI (Constant Altitude Plan Indicator)*

Prodotto, con frequenza 15 minuti, riferito ad un'altitudine fissa, solitamente a 2000, 3000, 5000 metri.

Al termine di una valutazione volumetrica del radar viene effettuata una sezione orizzontale dei dati.

Attualmente è una delle rappresentazioni più utilizzate nel monitoraggio a diverse quote.

- *VMI [dBZ] (Vertical Maximum Intensity)*

Prodotto, con frequenza 15 minuti, raffigurante i massimi valori di una variabile scelta sull'asse verticale.

- *SRI [$\frac{mm}{h}$] (Surface Rainfall Intensity)*

Prodotto, con frequenza 15 minuti, già elaborato: non fa riferimento ai dati grezzi, ma concede una stima dell'intensità di precipitazione al suolo.

- *SRT [mm] (Surface Rainfall Total)*

Prodotto, con frequenza 60 minuti ottenuta da una serie di mappe SRI raffigurante la pioggia totale caduta in un periodo temporale prescelto: 1 ora, 3 ore, 6 ore, 12 ore, 24 ore.

2: Stima della precipitazione tramite l'utilizzo del radar

2.1 Relazione tra riflettività ed intensità di pioggia

Il radar meteorologico permette il rilevamento, in un volume atmosferico, della presenza di idrometeore grazie all'invio e alla ricezione di onde elettromagnetiche. Infatti, il trasmettitore dello strumento ne genera un fascio che viene direzionato tramite un'antenna. Durante la loro propagazione le onde intercettano i bersagli posti sul loro tragitto, scambiando energia: una parte di questa viene assorbita dagli oggetti ed un'altra quota viene riflessa in atmosfera, dunque anche nella direzione del radar, che viene rielaborata dal ricevitore.

Nella fase di ricezione del segnale retro-diffuso la prima informazione che viene estratta è la riflettività Z , grazie alla sua correlazione con la potenza media dell'onda elettromagnetica, ricevuta dal bersaglio, tramite l'equazione:

$$Pr = \frac{C \cdot k^2 \cdot \sum D^6}{r^2} \quad (\text{Equazione 1})$$

dove:

- C è la costante radar;
- k è la costante dielettrica;
- D è il diametro delle gocce.

Sapendo che il segnale elaborato dal radar è in funzione della distribuzione di grandezza delle idrometeore, si pone:

$$Z = \sum D^6 \quad (\text{Equazione 2})$$

ottenendo:

$$Pr = \frac{C \cdot K \cdot Z}{r^2} \quad (\text{Equazione 3})$$

dove:

- Z è la riflettività;
- C e K sono le costanti radar;
- r è la distanza dell'idrometeora dal radar;
- Pr è la potenza media ricevuta dal bersaglio.

Inoltre, la riflettività Z è legata all'intensità di precipitazione attraverso una legge di potenza definita come:

$$Z = aR^b \quad (\text{Equazione 4})$$

dove:

- R è la precipitazione $\left[\frac{mm}{h}\right]$;
- Z è la riflettività $\left[\frac{mm^6}{mm^3}\right]$;
- a, b sono costanti dipendenti dal tipo di precipitazione.

La definizione dei coefficienti a e b è un problema aperto nella comunità scientifica, a causa della loro estrema variabilità e dipendenza da molteplici fattori.

Essi possono variare nello spazio e nel tempo e sono dipendenti dal tipo di precipitazione (convettiva o stratiforme), dalla grandezza e caratteristiche delle idrometeore e dalla località.

Data la complessità della determinazione, attualmente sono disponibili in letteratura diverse coppie di valori ottenute sperimentalmente per determinate zone e validate dalle reti di strumentazioni territoriali locali.

Nella stima di pioggia da radar meteorologico, visto il problema dell'identificazione dei parametri caratteristici, esistono due tipi di relazioni Z - R :

- “non adattive”, dove i parametri a e b sono costanti nel tempo e nello spazio;
- “adattive”, dove i parametri a e b variano sia nel tempo sia nello spazio.

2.2 Metodologie non adattive

Nella conversione del dato ottenuto dal radar meteorologico al dato di intensità di precipitazioni l'approccio attualmente più adoperato è quello "non adattivo", grazie alla sua facile applicazione ed al suo basso costo computazionale: nella legge $Z = aR^b$ i coefficienti a e b sono delle costanti, sia nel tempo sia nello spazio (figura 2). Nonostante i vantaggi applicativi sono presenti delle imprecisioni: non vengono infatti presi in considerazioni i fattori di dipendenza orografica e di tipologia di precipitazione.

In letteratura la calibrazione dei coefficienti a e b è una della più dibattute: diversi autori hanno cercato di stabilire delle relazioni che permettessero di avere la stima più minimizzata. Ogni studio è però influenzato dai dati di partenza: dalla loro quantità, accuratezza, luogo di esistenza, caratteristiche climatologiche ed eventi analizzati. Dunque, si nota come le relazioni siano intimamente dipendenti dal dominio di definizione, rendendo le varie relazioni poco adatte ad un'applicazione generalizzata.

Equation	Reference	Location	Remarks
$320R^{1.44}$	Wexler, R. (1947)	Washington, D.C.	8 rain intensities, each a mean of about 10 storms of same intensity
$214R^{1.58}$	Wexler (1948)	Washington, D.C. Ynyslas, Great Britain Shoeburyness, England Hawaii	98 storms--original data 5 rainstorms 4 rainstorms 50 storms, orographic rain
$224R^{1.54}$			
$630R^{1.45}$			
$208R^{1.53}$			
$190R^{1.72}$			
$190R^{1.72}$	Marshall, Langille, and Palmer (1947)	Various locations	Various types of rain
$220R^{1.60}$	Marshall and Palmer (1948)	Various locations	Various types of rain
$295R^{1.61}$	Hood (1950)	Canada	270 samples, 7 rainstorms; light rain 1-3 mm/hr; heavy thunderstorms 50 mm/hr
$180R^{1.55}$	Boucher (1951)	Cambridge, Mass.	63 rain samples, widespread rain both uniform and variable; showers and thunderstorms
$127R^{2.87}$	Higgs (1952)	Australia	Showers, 8 months of observation
$17R^{1.55}$	Blanchard (1953)	Hawaii	Orographic rain within cloud Orographic rain at cloud base Nonorographic rain--thunderstorms
$31R^{1.71}$			
$290R^{1.41}$			
$127R^{2.29}$	Twomey (1953)	Sydney, Australia	Rain rates $0.2-9.0 \text{ mm hr}^{-1}$
$396R^{1.35}$	Jones (1955)	Central Illinois	1,270 1-minute observations--all rains 560 1-minute observations--thunderstorms 330 1-minute observations--rain showers 380 1-minute observations--continuous rain
$486R^{1.37}$			
$380R^{1.24}$			
$313R^{1.25}$			

Figura 2 Esempi di relazioni non adattive in letteratura (Fonte: NOAA)

2.3 Metodologie adattive

2.3.1 Alfieri et al. (2010)

La tecnica elaborata dal Alfieri et al. (2010) prevede la stima dei coefficienti a e b della relazione $Z-R$ al variare del tempo e dei pluviometri considerati.

Lo studio viene realizzato elaborando una stima areale delle precipitazioni in tempo reale in un'area di 25 km intorno al radar Bric della Croce, sito a Pecetto Torinese (TO), (figura 3), ed utilizzando diciannove eventi di natura mista, verificatesi tra il 2003 e il 2006, intercettati dalle venti stazioni poste nell'area di interesse.

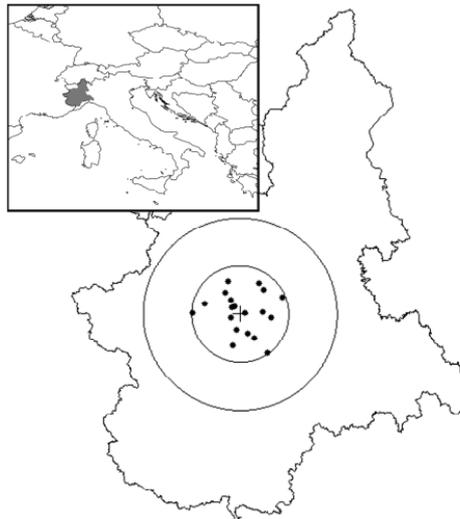


Figura 3 Area interessata dallo studio di Alfieri et al. (2010) (Fronte: Alfieri et al.(2010))

L'analisi di Alfieri prevede la possibilità di stimare le coppie a e b in ogni istante di tempo, utilizzando le coppie $Z-R$ valide in quell'intervallo temporale per ogni pluviometro della zona in esame.

La taratura dei coefficienti avviene in corrispondenza delle stazioni pluviometriche, dove si confrontano i dati pluviometrici con quelli del radar.

L'applicazione di questa metodologia non è però realizzabile a causa delle incertezze intrinseche degli strumenti. In più, a queste problematiche si aggiungono le differenze di copertura spaziale e temporale: il radar elabora in tempo reale misure areali, dove una cella è funzione della risoluzione dello strumento e dalla quota dipendente dalla distanza di

- Utilizzo del valore di primo tentativo ottenuto tramite la relazione lineare.

$$\log Z = \log \hat{a} + \hat{b} \log R \quad (\text{Equazione 5})$$

dove a e b sono i valori da stimare a partire dalle coppie Z e R ottenute dalla fase precedente.

- Valutazione dei parametri che minimizzano lo scarto quadratico tra precipitazione osservata e quella stimata.

$$R_{stim} = 10^{\left(\frac{Z^*}{10\hat{b}}\right) - \left(\frac{\log_{10}\hat{a}}{\hat{b}}\right)} \quad (\text{Equazione 6})$$

dove:

- $Z^* = 10 \log Z$ [dBz];
- \hat{a} e \hat{b} sono i coefficienti stimati.

- Utilizzo della relazione valida più prossima.

Nel caso in cui nella finestra temporale selezionata non sia possibile ottenere una relazione valida, a causa di un numero insufficiente di coppie Z - R valide, oppure nella situazione in cui i valori a e b superino i limiti imposti ($a > 1, b > 1$), se non sono disponibili delle relazioni, viene adoperata la relazione di *bulk adjustment*, ottenuta dall'applicazione di primo tentativo ad un campione di eventi diverso, limitatamente all'area in analisi.

Data la disponibilità esigua dei dati a terra, a causa della ristretta zona in esame, gli autori hanno osservato che il Mean Absolute Error (MAE) crea una valutazione migliore rispetto ai metodi disponibili in letteratura solo nel caso di una finestra di calibrazione con durata compresa tra 8 e 24 ore.

2.3.2. Progetto FLORA (2012)

Il lavoro di Alfieri viene approfondito nel progetto FLORA, dove è ricalibrata la relazione fissa che intercorre tra Z e R , attraverso delle modifiche sulla numerosità di dati adoperati nello studio: viene utilizzata l'intera rete di stazioni pluviometriche dell'Arpa Piemonte, comprendente 378 strumenti e sono considerati sia eventi convettivi sia eventi stratiformi.

Lo studio realizzato è articolato nelle seguenti fasi:

1. Selezione degli eventi

Gli eventi trattati si sono verificati in un intervallo temporale compreso tra il 2003 e il 2008.

Gli eventi convettivi, localizzati e caratterizzati da intensità elevate e durate brevi, sono scelti selezionando le date degli eventi dove sono presenti un numero elevato di stazioni che registrano precipitazioni massime annue.

Gli eventi stratiformi, invece, sono valutati in base al numero di macro-bacini coinvolti durante gli eventi in cui si sono verificati i massimi annui di precipitazione giornaliera: gli autori hanno considerato come quantità cinque bacini piemontesi su cui focalizzare l'attenzione.

2. Costruzione e scelta della mappa di visibilità

Nella taratura dei coefficienti della relazione $Z-R$, avendo notato una sottostima delle zone coperte dal radar a causa dell'orografia del terreno, sono stati eliminati alcuni pluviometri dalla rete in analisi. Per far ciò si sono adoperati diversi criteri di selezione: la distanza dal radar, l'altezza del raggio inferiore, la quota del terreno e l'altezza minima del raggio sul suolo.

Dopo attente valutazioni, gli autori hanno scelto come descrittore valido per contenere gli errori relativi ad ogni pluviometro l'altezza del raggio: con lo scopo di tutelare la maggiore informazione possibile, ma scartando le zone con bassa visibilità, è stata scelta una quota del raggio pari a 4000 m.s.l.m. Questa rappresenta un buon compromesso tra l'accettazione dell'errore ed il numero di pluviometri inclusi correttamente, come si può osservare in figura 5.

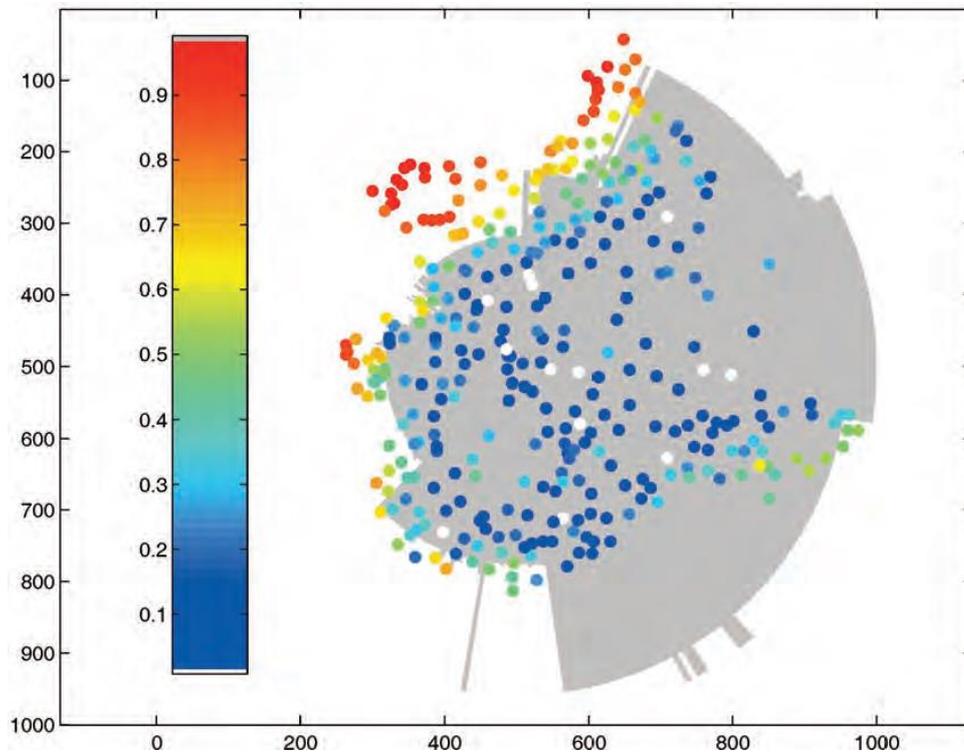


Figura 5 Zona di accettazione del fascio radar in base agli errori relativi di stazione. (Fonte: Report FLORA, 2012)

3. Taratura della relazione Z-R

L'obiettivo del progetto è quello di determinare una coppia (a, b) utile alla stima della precipitazione sia in corrispondenza di ogni stazione sia a scala di evento. Confrontando la precipitazione osservata e stimata ogni dieci minuti e minimizzandone lo scarto assoluto si ottengono i seguenti coefficienti:

$$\begin{cases} a = 40.5 \\ b = 2.5 \end{cases}$$

Nell'utilizzo di tali parametri con il solo vincolo della soglia di quota è stata riscontrata un'importante sottostima per le stazioni più distanti. Per tale motivazione è stata introdotta un'altra limitazione: la distanza limite viene fissata a 125 km, come si può osservare in figura 6, riducendo in questo modo il numero di pluviometri utilizzati nello studio a 248.

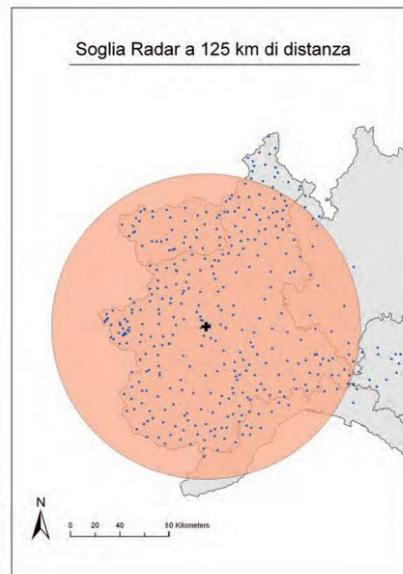


Figura 6 Stazioni comprese nel raggio di 125 km dal radar Bric della Croce (Fonte: Report FLORA,2012)

4. Stima incertezza associata alle precipitazioni ricostruite da radar

Dopo la valutazione dei parametri a e b risulta necessario valutare l'incertezza della stima, aggregando per ogni stazione in intervalli di 1 ora i dati di precipitazione, sia osservata sia stimata da radar, valutandone la deviazione standard. Il suo andamento in rapporto alla precipitazione stimata da radar può essere valutato tramite la regressione lineare:

$$\sigma = \beta + \alpha \hat{R}$$

Dunque, si nota che l'utilizzo di una relazione fissa permette di adoperare il radar meteorologico come mezzo previsionale degli eventi alluvionali nella zona piemontese.

I valori ottenuti dei coefficienti sono diversi da quelli in letteratura: a risulta più basso dei valori classici (150-300), b invece assume valori più elevati (solitamente si aggirano intorno a 1.5).

Tali differenze sono accettabili in quanto i valori ottimali si dispongono lungo una diagonale sul piano $\{\log(a), b\}$ ed inoltre sono stati utilizzati eventi particolarmente intensi nel tarare i coefficienti, a differenza dei corrispettivi eventi utilizzati in letteratura.

2.3.3. Tecnica adattiva nello spazio e nel tempo (ATS) (2015)

La tecnica ATS, proposta da Libertino et al. (2015), nasce con l'obiettivo di estendere a scala regionale il lavoro di Alfieri adoperando i risultati ottenuti dal progetto FLORA (2012).

Lo strumento in questione, effettuando un'analisi sia spaziale sia temporale, ha potuto evidenziare il ruolo operativo del radar nell'ambito della stima dei campi precipitativi.

Per poter sviluppare al meglio questa nuova tecnica è stato necessario effettuare delle modifiche:

- è stato ampliato il numero di eventi analizzati, in modo da avere un campione più rappresentativo per poter effettuare una stima (sono stati aggiunti 17 eventi convettivi e 7 stratiformi verificatesi nel periodo compreso tra il 2011 e il 2015, ottenendo un dataset di un totale di 40 eventi);
- è stata effettuata una nuova taratura dei coefficienti di *bulk adjustment* in cross validazione;
- viene utilizzata una finestra di taratura pari a quella della frequenza di acquisizione dei dati, pari a dieci minuti. In questo modo è possibile realizzare una stima in tempo reale.

La tecnica basa la sua analisi sulla designazione di due domini di calibrazione:

1. dominio temporale;
2. dominio spaziale.

1. *Dominio temporale*

La finestra di calibrazione dei due coefficienti, a e b , viene utilizzata in tempo reale, con il vantaggio di poter osservare l'evoluzione dei coefficienti e di conseguenza la calibrazione della legge di potenza che sussiste tra Z e R . Infatti, nell'istante t_i vengono stimati adoperando le coppie Z - R comprese nella finestra di ampiezza $d = 1 h$ dell'intervallo precedente $[t_{i+d}; t_i]$ (figura 7).

Si verificano però delle problematiche causate dal ristretto dominio di stima che comporta una variabilità eccessiva dei coefficienti.

Per poter arginare queste problematiche si introduce un valore soglia di riflettività nel tempo, valutata per ogni t_i utilizzando gli strumenti con precipitazione nulla segnalata in t_{i-1} .

Essa è definita come il quantile (0.85) (con la probabilità cumulata q) della distribuzione empirica dei dati di riflettività associati ai pluviometri interessati e permette di:

- escludere i valori nulli o prossimi a zero delle precipitazioni;
- comprendere il rumore delle misure radar a causa delle incertezze e del campionamento;
- segnalare la presenza o assenza di precipitazione nell'istante considerato.

Infatti, per valori inferiori al valore di soglia si ritiene assente la precipitazione.

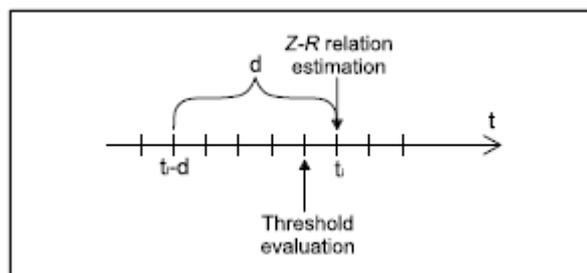


Figura 7 Rappresentazione del dominio temporale di stima (Fonte: Libertino et al. (2015))

2. Dominio spaziale

Oltre ad essere variabili nel tempo, i coefficienti variano anche nello spazio: per comprendere le loro variazioni si prendono in considerazione $N=20$ pluviometri vicini a quello considerato nell'analisi dove si adoperano solo i valori di Z superiori al valore di soglia.

Nel caso in cui le coppie $Z-R$ siano di un numero inferiore a N , si tenta di trovare una stima adoperando quelle disponibili; se tale tentativo non crea una stima robusta, non convergendo dopo 400 iterazioni, viene utilizzata una relazione di *bulk adjustment* di backup regionale, definita da FLORA (2012).

Il valore soglia ed il verificarsi delle precipitazioni varia di continuo, portando ad una necessità di considerare il numero e la posizione delle stazioni valide per ogni posizione p_j in ogni t_i .

I valori accettabili di a e b si determinano minimizzando lo scarto quadratico tra i valori osservati e quelli stimati, ripuliti del valore di riflettività soglia.

$$\hat{R} = 10^{\left(\frac{Z^* - Z_{soglia}^*}{10\hat{b}}\right) - \left(\frac{\log_{10}\hat{a}}{\hat{b}}\right)} \quad (\text{Equazione 7})$$

dove:

- \hat{a} e \hat{b} sono i coefficienti stimati;
- Z^* e Z_{soglia}^* (entrambe in dBZ) sono il dato misurato di riflettività e il valore soglia valutato nell'istante considerato.

La stima viene condotta nel piano $Z-R$ mediante regressione non lineare; i coefficienti sono ottimizzati a partire da quelli calibrati a scala regionale nel progetto FLORA (2012).

La calibrazione e la verifica sono effettuate con una cross-validazione per ogni stazione, eliminando un pluviometro alla volta dalla valutazione $Z-R$ per poi confrontare la stima con il valore di precipitazione realmente misurata dal pluviometro escluso.

3: Evento alluvionale 19-24 ottobre 2019 nel basso Alessandrino

Nel seguente capitolo viene ricostruito l'evento alluvionale verificatosi nell'autunno 2019 nelle zone al confine tra il Piemonte e la Liguria interessate, con frequenza ormai sempre più assidua, da eventi precipitativi di straordinaria intensità.

La scelta di effettuare un'analisi di questo evento alluvionale è stata dettata dalla sua eccezionalità in termini di precipitazioni, ed in particolar modo per la presenza contemporanea di strutture organizzate convettive, che hanno causato sul territorio alessandrino devastanti conseguenze di tipo alluvionale e di versante.

Nei giorni compresi tra il 19 ed il 24 ottobre 2019 l'Italia nordoccidentale è stata attraversata da una perturbazione proveniente dalla Spagna che ha generato precipitazioni particolarmente intense nelle zone orientali del Piemonte per poi, successivamente, traslare verso ovest.

L'apice di intensità dell'evento è stato raggiunto nel pomeriggio di lunedì 21 ottobre a causa della formazione in corrispondenza del Golfo di Genova di una rara struttura temporalesca autorigenerante caratterizzato da violenti fenomeni precipitativi di natura convettiva. Questa è riuscita a traslare celermente in corrispondenza dell'Alessandrino, in particolar modo tra Ovada, Novi e Gavi, dove è stazionata per circa 12 ore, generando piogge di intensità straordinariamente elevata. I picchi più alti sono stati raggiunti nella stazione di Gavi, dove in dodici ore sono stati registrati dalla rete di telemisura di Arpa Piemonte circa 428 mm.

La caduta di circa la metà della pioggia registrata in un anno in un intervallo temporale estremamente breve su di un terreno saturo dalle piogge antecedenti ha innescato conseguenze devastanti sul territorio, quali frane e smottamenti. In contemporanea si è verificato un innalzamento rapido dei livelli idrometrici, dapprima dei rii e successivamente dei torrenti principali, quali l'Orba e la Bormida, che hanno raggiunto la soglia di pericolo, comportando forti disagi alla popolazione ed effetti distruttivi nella provincia alessandrina.

3.1 Analisi metereologica

Per poter comprendere in maniera più dettagliata il quadro meteorologico e le conseguenze sul territorio si è fatto riferimento ai Rapporti di evento effettuati dal Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali di Arpa Piemonte.

Nei giorni compresi tra il 19 ottobre ed il 24 ottobre 2019 la convergenza di due aree opposte di pressione in corrispondenza dell'area compresa tra il Piemonte meridionale, la Liguria e la Lombardia orientale ha causato intense precipitazioni, con picchi estremamente elevati per il periodo, causando ingenti danni nelle zone tra l'alessandrino ed il genovese.

Le regioni del Piemonte e della Liguria sono state attraversate da un evento di duplice identità: le zone settentrionali del Piemonte sono state caratterizzate da fenomeni di tipo avvevivo e concentrate nei primi giorni, mentre le regioni meridionali hanno avuto un carattere convettivo, con la presenza di strutture organizzate. In Liguria, a causa dell'elevata durata temporale e dell'intensità ragguardevole, sono state registrate nell'intero periodo cumulate che hanno raggiunto i 700 mm.

Il giorno in cui l'evento ha acquisito la sua massima intensità è stato lunedì 21 ottobre, dove le precipitazioni hanno stazionato sul territorio Alessandrino per circa 12 ore, con valori estremamente elevati, in particolar modo nella Val d'Orba, nell'Ovadese e nel Tortonese.

A causa delle forti intensità, sia della giornata di lunedì sia dei giorni precedenti, sono stati rilevati valori significativi per i corsi d'acqua principali di Orba, Bormida e Scrivia. In particolar modo, l'Orba a Casalcermelli (AL) ha superato i livelli di pericolo e ha registrato una portata al colmo con tempo di ritorno di 500 anni. Nel pomeriggio sono state interessate le zone dei bacini genovesi e quelli della Stura, che con il loro innalzamento hanno causato frane e smottamenti nei comuni di Rossiglione (GE) e di Campo Ligure (GE), interrompendo la viabilità ferroviaria in direzione di Torino, Milano e Ovada e causando l'evacuazione di un condominio soggetto ad una colata di fango.

L'evento alluvionale in analisi può essere analizzato distinguendo due stadi:

- una prima fase, caratterizzata dalla presenza di fenomeni convettivi, che si è sviluppata dal 19 al 21 ottobre;
- una seconda fase, costituita da un'interazione intensa tra i flussi umidi e l'orografia del territorio, che ha avuto luogo dal 22 al 24 ottobre.

Prima fase dell'evento

Sabato 19 ottobre è stato il primo giorno in cui si sono verificati i primi fenomeni precipitativi sul nord ovest italiano, a causa di una vasta area di depressione proveniente dalla Gran Bretagna che ha trasportato masse di aria umida. Il Piemonte è stato coinvolto in duplice maniera: le provincie di Biella, Vercelli e Verbania e le pianure confinanti con la Lombardia, sono state interessate da fenomeni di tipo avvevativo, mentre sullo spartiacque tra Piemonte e Liguria sono state registrate precipitazioni di carattere convettivo, raggiungendo picchi estremamente alti per il periodo considerato.

Le masse di aria umida provenienti dall'Atlantico hanno iniziato a direzionarsi verso l'Europa sudoccidentale, apportando ulteriori masse di aria umida sul Nord-Ovest italiano.

La traslazione progressiva del vortice di bassa pressione verso sud ha trasportato l'aria umida e calda in direzione nord che, scontrandosi con l'alta pressione presente sul resto dell'Italia, ha contribuito a originare un blocco della saccatura, creando in corrispondenza del Piemonte, Liguria e Lombardia orientale una zona con due differenti aree di pressione.

La giornata del 20 ottobre è stata caratterizzata dapprima da precipitazioni localizzate e successivamente da fenomeni che hanno interessato tutta la regione. Nella mattinata si sono verificati episodi temporaleschi in corrispondenza delle Langhe, dell'Astigiano e del Piemonte settentrionale, mentre nel pomeriggio si sono sviluppati fenomeni di intensità maggiore tra Verbania e Biella e nel basso Alessandrino, coinvolgendo anche la provincia di Savona (figura 8).

Sono stati registrati massimi su 24 ore di 280 mm a Settepani (SV), di 217 mm a Montenotte Inferiore (SV) e di 88 mm – di cui 73,6 mm in 6 ore - a Serole Bric Pischera (AL) e Ponzzone Cimaferle (AL), dove sono stati registrati 84,2 mm.

In corrispondenza della zona del Ponente Ligure sono state osservate precipitazioni stazionarie per circa 12 ore nell'entroterra Savonese.

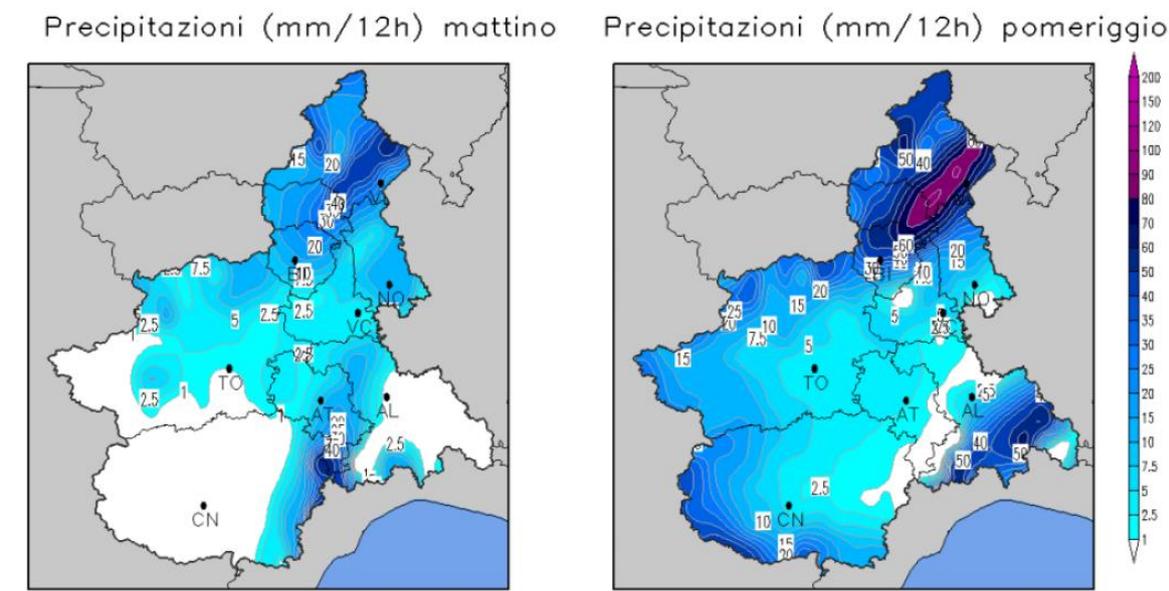


Figura 8 Precipitazioni osservate nella giornata di domenica 20 ottobre 2019 (Fonte: Arpa Piemonte)

Durante la giornata del 21 ottobre hanno avuto luogo gli episodi più intensi dell'evento alluvionale, dovuti al verificarsi, in contemporanea, di due strutture convettive al confine tra Piemonte e Liguria:

- *Mesoscale Convective System (MSC).*

Struttura temporalesca organizzata nata in prossimità di Marsiglia nelle prime ore dell'alba, a causa della spinta di un flusso sudoccidentale in quota, si è mossa velocemente verso il Savonese, per poi traslare in direzione dell'Alessandrino, dell'Astigiano e della Lombardia sudorientale, fino ad esaurirsi in prossimità dell'arco alpino centro-orientale verso mezzogiorno (figura 9). Le precipitazioni sono state accompagnate da raffiche di vento importanti da intensi fenomeni elettrici.

Nonostante il suo celere spostamento -circa 6 ore- si sono verificate precipitazioni molto intense: nelle prime tre ore della giornata sono stati registrati 72 mm a Basaluzzo (AL), 65 mm a Castellar Ponzano (AL) e 56 mm a Ovada (AL).

Nelle regioni settentrionali, invece, si sono verificati fenomeni di carattere avvevativo.

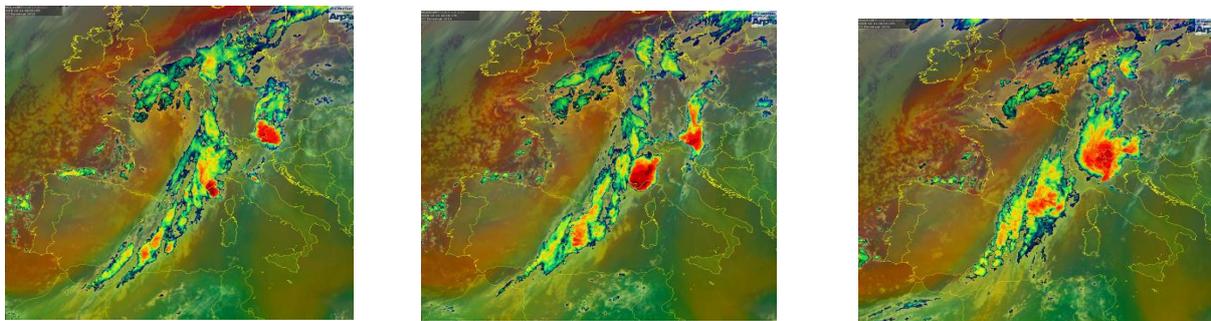


Figura 9 Formazione e traslazione in direzione est del MSC osservato dal satellite Meteosat (EUMETSAT) alle ore 00:00 UTC, 3:00 UTC, 6:00 UTC. (Fonte: Arpa Piemonte)

- *V-shaped thunderstorm (temporale a V).*

Rara struttura temporalesca semi-stazionaria caratterizzata da precipitazioni convettive intense, nasce all'interno di una avvezione calda e si rigenera continuamente grazie agli apporti di aria umida derivante dal mare.

Nel caso in questione, lo scontro tra un flusso di aria estremamente calda proveniente da sud verso il golfo di Genova, chiamato "*Warm conveyor belt (WCB)*" o "nastro trasportatore umido" ed il corrispettivo flusso di aria fresco e asciutto da nord hanno permesso la crescita e la traslazione del temporale che, a causa di un blocco di alta pressione posto sul territorio centro-orientale italiano, non è riuscito a dirigersi verso est.

Nelle ore centrali del giorno 21, il *V-shaped* si è generato in corrispondenza del ponente genovese e del suo entroterra, ed è stazionato tra Rossiglione (GE) e Gavi (AL) per circa 12 ore, incrementando il suo volume grazie all'effetto orografico dei rilievi appenninici, fino a coinvolgere anche il Pavese, il Lodigiano e il Cremasco (figura 10).

Nel pomeriggio del 21 ottobre si sono registrati valori eccezionali nelle zone della Val d'Orba, Ovadese e Tortonese: le stazioni di Bric Castellaro (AL), Arquata Scrivia (AL), Sardigliano (AL), Castel Ponzano (AL), hanno registrato cumulate di oltre 300 mm, con picchi orari compresi tra 60 mm e 80mm.

Il valore più elevato registrato dalla rete di telemisura di Arpa Piemonte, in 12 ore, è stato quello della stazione di Gavi (AL) dove sono caduti 428mm, seguito dalla stazione di Rossiglione (GE) che ha superato i 400 mm.

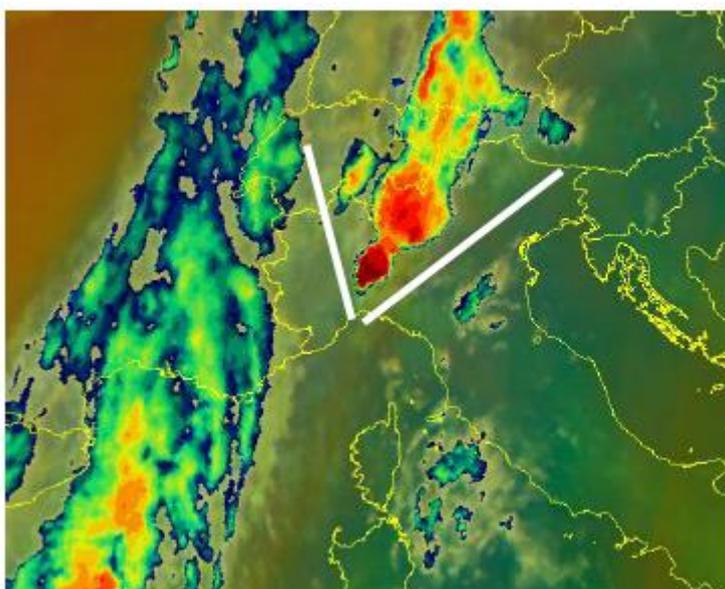


Figura 10 Immagine Meteosat raffigurante la forma a V del sistema convettivo presente sull'Alessandrino alle ore 15:00 UTC del 21 ottobre (Fonte: Arpa Piemonte)

Nelle prime ore dell'alba di martedì 22 il sistema è arretrato verso il Savonese per poi esaurirsi; si sono verificate precipitazioni deboli e sparse nella mattinata di martedì.

Seconda fase

Il Piemonte, nella mattinata di martedì 22, viene raggiunto da flussi umidi provenienti dall'Africa che hanno causato precipitazioni moderate con picchi sulle zone settentrionali e nordoccidentali, con neve sopra i 2700 m, mentre sui versanti genovesi e savonesi si sono registrate forti precipitazioni (figura 11).

Nel pomeriggio sul Nord Ovest un leggero aumento di alta pressione ha causato un'attenuazione della ventilazione nei bassi strati e un indebolimento dei fenomeni.

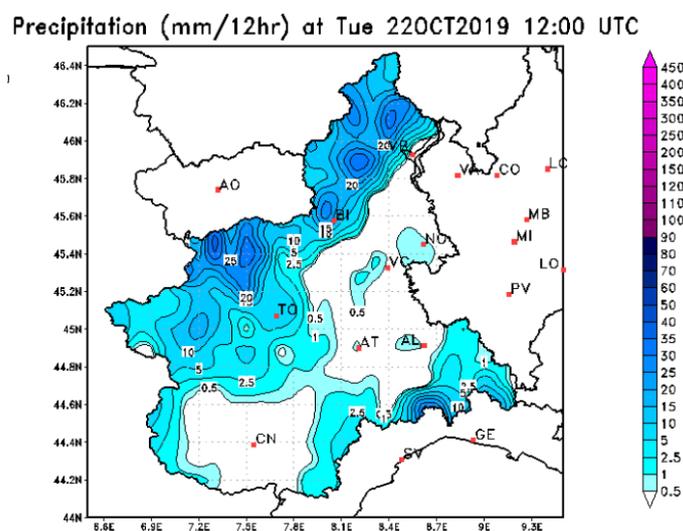


Figura 11 Precipitazioni cumulate in 12 ore il giorno 22 ottobre in Piemonte (Fonte: Arpa Piemonte)

Il flusso di depressione posizionato in corrispondenza della Spagna, mercoledì 23 si è spostato verso est in direzione del Mar Ligure, unendosi, nella notte, alla saccatura atlantica posizionata a nord per poi avanzare verso est, con un flusso umido e perturbato.

Nella tarda mattinata l'arrivo di venti caldi e umidi da sud ha causato la ripresa delle precipitazioni, che hanno avuto la tendenza ad intensificarsi nel pomeriggio, a partire dalle zone sud-occidentali, interessate da valori elevati a carattere temporalesco (figura 12).

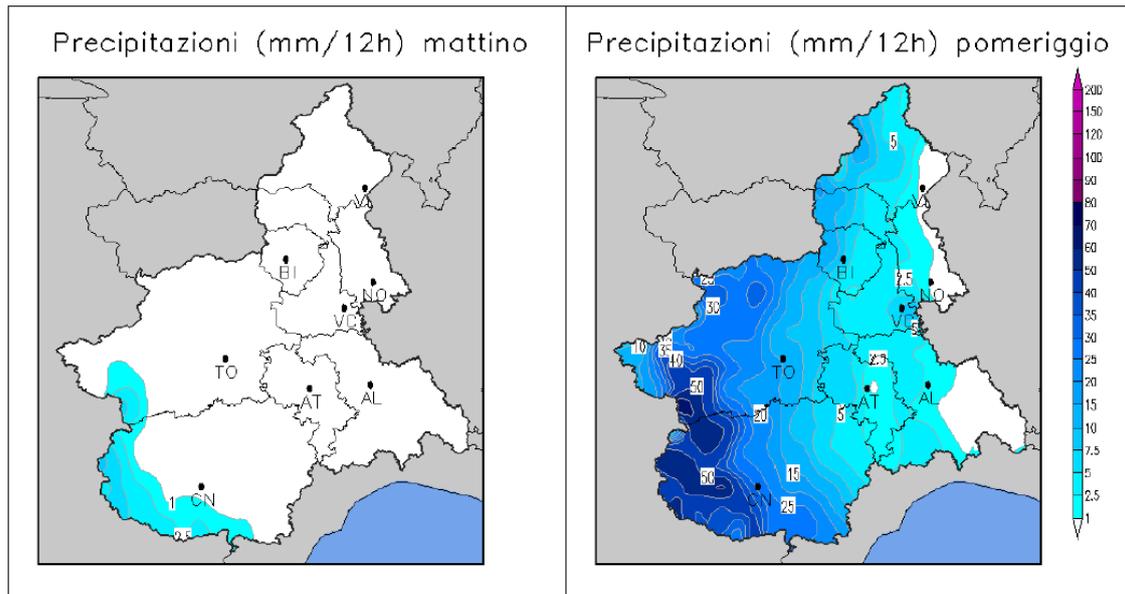


Figura 12 Precipitazioni misurate il giorno 23 ottobre (Fonte: Arpa Piemonte)

Nella tarda serata l'intera struttura è tralata verso est, coinvolgendo le zone orientali di Piemonte, Liguria e Lombardia con piogge deboli e sparse sul settore occidentale.

Si è verificata una riattivazione delle precipitazioni nella mattinata del 24 ottobre sul settore occidentale, a causa di un afflusso di aria generato da una depressione in corrispondenza del Golfo Ligure, con un aumento di intensità sulle zone orientali del Piemonte, al confine con la Lombardia e la Liguria, con caratteristiche anche temporalesche.

Nel pomeriggio si sono verificate precipitazioni sulle zone montane e pedemontane nordoccidentali, mentre il flusso da sud in quota è traslato velocemente favorendo un miglioramento delle condizioni sul resto della regione (figura 13).

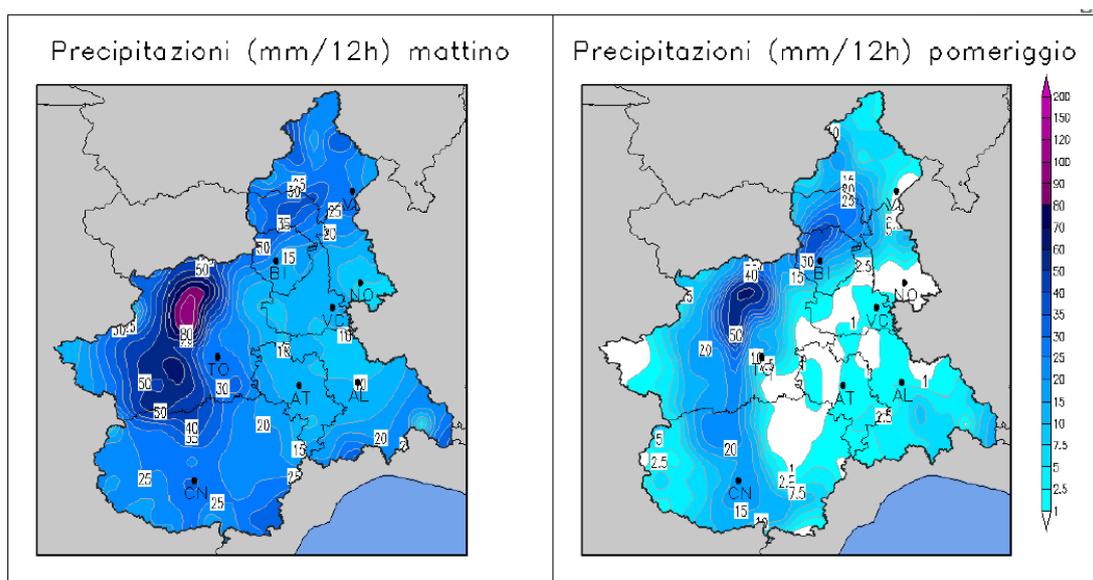


Figura 13 Precipitazioni misurate il giorno 24 ottobre. (Fonte: Arpa Piemonte)

3.2 Maggiori conseguenze sul territorio

Nel territorio piemontese la zona maggiormente colpita è stata quella compresa tra Ovada e Gavi, entrambe nell'Alessandrino, dove le piogge hanno raggiunto intensità estremamente ragguardevoli, causando dissesti superficiali di versante oppure processi legati a locali esondazioni di bacini.

A seconda della diversa conformazione litologica e della distribuzione della precipitazione non omogenea gli effetti sulla provincia sono stati differenti.

Nelle zone meridionali dell'area coinvolta, tra Fraconalto ed il Parco delle Capanne di Maracolo, si sono verificati processi di piene e colate detritiche con limitati fenomeni di versante, grazie alle minori cumulate registrate, rispetto al resto del territorio, e alle coperture superficiali caratterizzate da maggiore permeabilità, meno inclini a mobilitare il terreno in caso di precipitazioni intense.

Nelle zone settentrionali, tra i comuni di Gavi, Arquata Scrivia e Serravalle Scrivia, caratterizzate da depositi con granulometria più fine, si sono verificati fenomeni franosi con frequenza maggiore.

A causa della saturazione e della fluidificazione dei terreni sciolti, si sono rilevati scivolamenti rapidi di terra e detriti che hanno avuto impatto sulla viabilità, sulle abitazioni e sui terreni coltivati.

In particolare, l'abitato di Gavi ha subito nuovamente colamenti superficiali, come era avvenuto nel passato evento alluvionale del 13 ottobre 2014, che hanno coinvolto il versante meridionale del Monte Moro, su cui si erge il Forte. I fenomeni franosi più impattanti hanno riguardato: la strada comunale, (figura 15) le strade provinciali di accesso alla città, gli edifici posti a monte di Piazza Dante Alighieri e l'Oratorio dei Turchini (figura 16).

Il Torrente Lemme non è esondato in città e non ha causato danni, ma il suo livello ha raggiunto quello delle abitazioni poste in sponda sinistra. Gli allagamenti più rilevanti che si sono verificati nella zona sono da imputare ai rii minori ed ai fossi stradali, come nel caso accaduto in Località Fabbriche e in Località Valle, a causa del Torrente Neirone, affluente di destra del Lemme (figura 14).

Nelle zone nord-occidentali comprendenti i comuni limitrofi di Ovada sono state registrate le più alte cumulate dell'evento che, unite alla caratteristica granulometria fine del territorio, hanno causato una riattivazione di diversi processi, quali colamenti rapidi di terra.



Figura 14 Guado sul Torrente Lemme a Gavi. (Fonte: Arpa Piemonte)



Figura 15 Strada comunale di Gavi ricoperta da materiale franato (Fonte: Arpa Piemonte)



Figura 16 Danni al tetto dell'Oratorio dei Turchini causati da frane superficiali del versante (Fonte: Arpa Piemonte)

4. Applicazione tecnica adattiva nello spazio e nel tempo (ATS)

Nella rinnovata prospettiva di gestione del rischio, è necessario effettuare una nuova tipologia di modellazione nella valutazione delle piogge, il cui regime e intensità si sta modificando sempre più negli ultimi anni. Con l'avvento del radar e dei suoi numerosi vantaggi l'ottimizzazione della stima dei campi di precipitazione ha visto un notevole sviluppo, dovuto anche all'uso combinato dello strumento con la rete di stazioni pluviometriche, che rappresenta un argomento ancora fortemente dibattuto in letteratura, dove sono presenti diversi approcci.

Nella seguente trattazione di tesi è stata applicata la “Tecnica adattiva nel tempo e nello spazio” ATS (2015), precedentemente descritta, per effettuare un'analisi dell'evento alluvionale verificatosi nel basso Alessandrino dal 19 al 24 ottobre 2019. Si è deciso di sondare le funzionalità del metodo in questo caso estremo ed indagare eventuali limitazioni causate dall'eccezionalità dell'evento, utili per eventuali future applicazioni.

La scelta dell'approccio “adattivo” è ricaduta in vista delle limitazioni delle tecniche a stima fissa, che non garantiscono un'adeguata attinenza con l'evento reale e non permettono una reale stima delle precipitazioni.

Per poter applicare il metodo ATS è necessario introdurre come dati input:

- i dati relativi alle stazioni pluviometriche forniti da Arpa Piemonte ogni dieci minuti;
- i dati di riflettività Z corrispondenti alla cella relativa alla posizione del pluviometro sul territorio forniti, ogni dieci minuti.

Gli output, per ogni evento considerato sono:

- i valori orari dei coefficienti a e b in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica;
- il valore orario del valore Z_{soglia} atto ad eliminare i valori di rumore;
- i valori orari e cumulati della stima della precipitazione per ogni stazione pluviometrica;
- scatter plot tra precipitazioni osservate e stimate, orarie e cumulate, in tutte le stazioni pluviometriche correttamente in funzione;
- i parametri descrittivi della correttezza della stima.

4.1 Dati disponibili e trattamento dati

In vista dell'applicazione del metodo ATS i dati disponibili sono stati manipolati per essere introdotti in maniera corretta come input.

I dati utilizzati in questo lavoro di tesi sono quelli relativi all'arco temporale intercorso tra il 19 ed il 24 ottobre 2019, essenzialmente di due tipologie diverse:

- I dati relativi delle stazioni pluviometriche forniti da Arpa Piemonte, ente preposto alla gestione della rete pluviometrica composta da 400 strumenti, raffigurata in figura 17. I dati utilizzati sono stati campionati ogni dieci minuti e sono riferiti alle altezze di pioggia misurate in corrispondenza della rete al suolo. Questi sono stati ordinati e riadattati secondo la necessità del metodo ATS. Per ogni stazione e per ogni intervallo temporale sono stati introdotti anno, mese, giorno, ore, minuti, codice stazione, latitudine, longitudine, altitudine ed altezza pioggia.

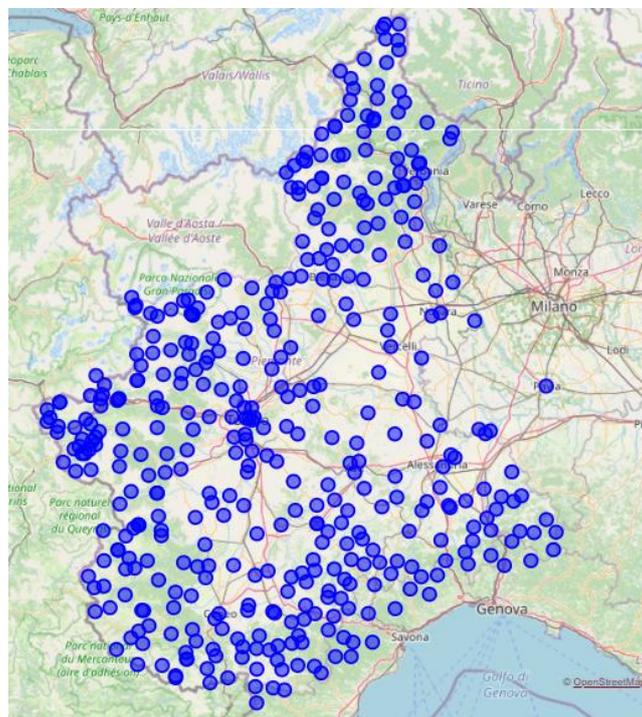


Figura 17 Rete di stazioni pluviometriche piemontese (Fonte: Arpa Piemonte)

- I prodotti SRI (*Surface Rainfall Intensity*) forniti ogni dieci minuti dal Centro Funzionale della Protezione Civile come mosaicatura delle immagini prodotte dai 24 radar caratterizzanti la rete nazionale in coordinate WGS 84 (figura 18). Sono rappresentazioni delle stime di pioggia ottenute tramite l'applicazione della legge di Marshall & Palmer (1948) su di un valore di riflettività acquisito come media lungo la verticale di ogni cella. Questi non sono infatti i dati grezzi provenienti dalla valutazione radar, ma immagini già elaborate.

Per l'applicazione, gli SRI sono stati riconvertiti nel sistema di riferimento di coordinate UTM 32N e, essendo riferite al territorio nazionale, sono state ritagliate riportando solo l'intorno del territorio piemontese per ottimizzazione computazionale.

Successivamente, i valori di altezza di pioggia sono stati riconvertiti in valori di riflettività utilizzando la legge di Marshall & Palmer ed, infine, campionati in modo da avere i dati di riflettività in corrispondenza di ogni cella relativa alla rete di pluviometri forniti.

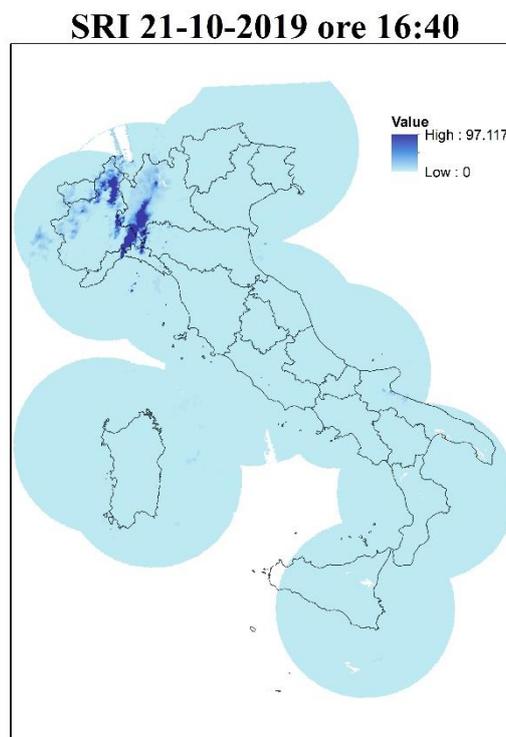


Figura 18 Esempio di prodotto SRI ore 16:40

4.2 Definizione di area di interesse e dell'intervallo temporale selezionato

Per comprendere al meglio il funzionamento ed eventuali limitazioni del metodo ATS anche in eventi estremi, in questo lavoro di tesi è stato scelto di concentrare l'attenzione sull'analisi delle sei ore più importanti dell'evento alluvionale del basso Alessandrino.

In particolar modo, è stato selezionato per l'analisi il giorno lunedì 21 ottobre 2019 in cui si è verificata, sullo spartiacque tra Piemonte e Liguria, la combinazione di due eventi estremi convettivi che hanno contribuito alla maggior parte delle precipitazioni cumulate dell'evento.

Infatti, in corrispondenza di Marsiglia in prossimità dell'alba, si è generata la prima struttura convettiva, il MCS (*Mesoscale Convective System*) che, in circa sei ore, si è spostata, interessando le zone del Savonese, dell'Astigiano e dell'Alessandrino, per poi traslare verso la Lombardia. In più, nelle prime ore del pomeriggio, in corrispondenza del Golfo di Genova, si è creato il *V-shaped thunderstorm*, una rara struttura temporalesca autorigenerante costituita da precipitazioni convettive intense. Il temporale, formato intorno alle 12:00 UTC, si è spostato velocemente verso l'entroterra ligure, tra Rossiglione (GE) e Gavi (AL), crescendo e rimanendo stazionario per circa 12 ore a causa della particolare conformazione orografica della zona e dell'alta pressione ad Est che ha ostacolato un suo possibile spostamento.

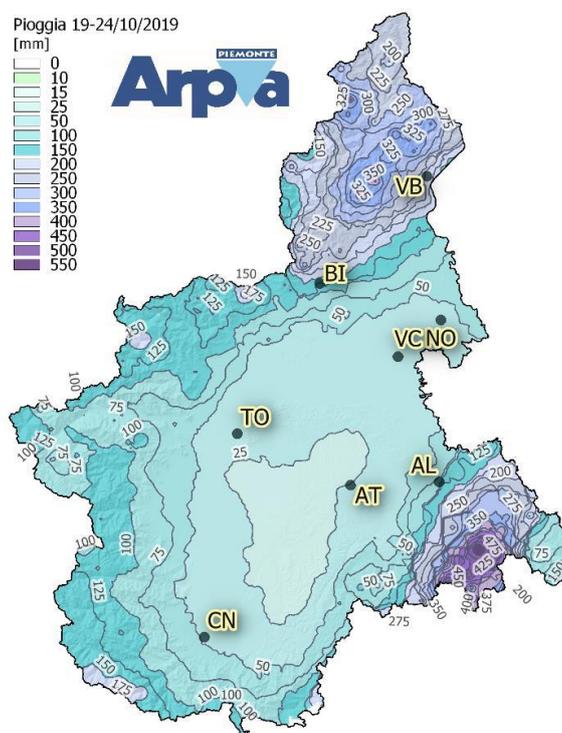


Figura 19 Rappresentazione delle cumulate nei 5 giorni dell'evento (Fonte: Arpa Piemonte)

4.3 Funzionamento del metodo

Lo scopo di questa trattazione di tesi è la creazione di campi di precipitazione utilizzando in maniera combinata la rete pluviometrica ed i prodotti del radar meteorologico attraverso il “Metodo adattivo dello spazio e nel tempo (ATS)”.

Per lo sviluppo e la rappresentazione di cui sopra sono stati utilizzati, in maniera combinata, i programmi *Matlab* e *ArcMap*.

Il metodo si articola nei seguenti passi:

- *Pretrattamento dei dati*

Per poter applicare in maniera rigorosa il metodo è necessario effettuare dei pretrattamenti, sia per i dati pluviometrici sia per i dati provenienti da radar:

- sono esclusi valori di riflettività superiori a 95 dBZ;
- i valori di precipitazione superiori a 100 mm/10 min non sono ammessi in quanto frutto di possibili errori strumentali;
- se i dati di riflettività assumono valori pari al fondo scala dello strumento, ovvero $Z = -31.5 \text{ dBZ}$ sono assunti come nulli;
- se almeno un dato, o di radar o di precipitazione, è NaN l’acquisizione combinata in quell’istante risulta nulla.

- *Compattazione dei dati*

I dati di input, inseriti come matrici di dimensioni 35712x11, vengono compattati in maniera più ottimizzata, in modo da ottenere, sia per la riflettività sia per la precipitazione, delle matrici di dimensione (istanti temporali x numero di pluviometri). In questo modo è possibile ottenere delle matrici Z e R riferite sia all’intervallo temporale di acquisizione sia della durata d di valutazione, riferiti sempre per ciascuna stazione.

- *Eliminazione dei pluviometri non funzionanti*

Vengono eliminati dall’analisi i pluviometri che non sono stati in funzione durante il periodo di osservazione oppure nel caso in cui in corrispondenza della cella il dato radar è assente.

Nel caso in esame sono stati esclusi ulteriori pluviometri, riportati in tabella 2.

Tabella 2 Elenco di stazioni pluviometriche escluse dal metodo ATS

Codice stazione	Anagrafica stazione
18083900	Lomello
12091900	Ponte Vedano
1134901	Lago di Valsoera
6166900	Spineto Scrivia
5064700	Mombaldone Bormida
4088900	Feisoglio
4233901	Andono Gesso
6001900	Acqui Terme
4080900	Abelloni Cherasca

- *Valutazione di Z_{soglia}*

La realizzazione di un metodo con la presenza di una Z_{soglia} adattiva permette l'utilizzo di una finestra temporale oraria in cui è possibile valutare i valori di Z associati a precipitazione nulla registrata da strumento. Questo è ottenuto nell'istante t in esame, come il quantile $q = 0.85$ della distribuzione dei dati di riflettività per i pluviometri associati nell'intervallo $[t_{i-1-d}, t_{i-1}]$.

In questo modo, la presenza di una Z_{soglia} crea una coerenza maggiore con la reale precipitazione in atto durante l'intervallo temporale: permette di distinguere la presenza o l'assenza di precipitazione nell'istante considerato. Infatti, per valori inferiori alla riflettività soglia si ritiene assente la precipitazione.

Uno svantaggio è però l'esclusione dei pluviometri che hanno acquisito i valori di precipitazione tra l'istante di designazione della soglia e quello in cui si effettua la stima. Si noti, che nel caso in cui $Z_{soglia} = NaN$ questa viene posta pari al fondo scala dello strumento. Si riportano, in tabella 3, i valori di Z_{soglia} ottenuti dall'applicazione della tecnica ATS.

Tabella 3 Valori di riflettività soglia per le sei ore in esame

Ore	Z_{soglia} [dBZ]
15:00	17.10
16:00	17.33
17:00	15.80
18:00	12.48
19:00	10.32
20:00	2.10

- *Definizione di pluviometri attivi*

La valutazione dei pluviometri attivi è di duplice entità:

- Temporale

Ogni ora vengono definiti i pluviometri attivi e non attivi dapprima in base alla presenza, o meno, di precipitazione registrata dagli strumenti e successivamente in base alla loro relazione con la Z_{soglia} .

Dunque, sono considerati

- inattivi: i pluviometri con $Z_{oraria} < Z_{soglia}$
- attivi: i pluviometri con $Z_{oraria} \geq Z_{soglia}$

- Spaziale

Per ogni pluviometro vengono valutati i pluviometri attivi nell'intorno dello strumento in considerazione all'istante t_{i-1} , adoperando il criterio spaziale di minima distanza. Il numero di pluviometri da considerare, $N = 20$, è stato scelto dopo attente valutazioni dagli autori del metodo: coniuga infatti sia gli aspetti di una rappresentazione coerente con la realtà sia la robustezza della stima.

La definizione dei pluviometri attivi permette di poter considerare i corrispettivi valori di R e Z , utili nella valutazione dei coefficienti a , b .

- *Valutazione dei coefficienti a, b .*

La stima dei coefficienti a, b , effettuate per ogni ora e per ogni pluviometro, è dipendente dalla definizione dei pluviometri attivi e dai valori di precipitazioni associati.

Infatti, nell'istante orario di valutazione, in base ai valori delle precipitazioni del pluviometro considerato e alla valutazione dei suoi pluviometri attivi, si presentano due casi:

- Se almeno un valore è nullo, i coefficienti a, b di primo tentativo sono pari ai coefficienti di FLORA (2012)

$$a = 40.5$$

$$b = 2.5$$

- Se non sono presenti valori nulli, si realizza una regressione lineare nel piano $\{Z, \log(R)\}$, ottenendo i coefficienti di primo tentativo. Nel caso in cui siano fuori dagli intervalli di rispetto, ovvero $a > 1$ e $b > 1$, vengono sostituiti con i coefficienti di FLORA (2012).

Successivamente, viene effettuata la regressione non lineare, adoperando come criterio quello dei minimi quadrati degli scarti su R . Si ottengono così, per ogni istante temporale e per ogni pluviometro, i valori di a, b .

Infine, questi risultati vengono revisionati: se a, b sono fuori dai limiti precedentemente illustrati, si utilizza la relazione più vicina o, in assenza di una valida, i coefficienti di FLORA.

- *Valutazione delle R stimate*

Come secondo output sono fornite le R stimate in corrispondenza di ogni stazione per ogni ora, adoperando i coefficienti ottenuti grazie alla valutazione spazio-temporale.

La valutazione delle precipitazioni stimate viene effettuata in base al valore di Z .

- Per $Z \geq Z_{soglia}$

$$\hat{R} = 10^{\left(\frac{Z^* - Z_{soglia}^*}{10^b}\right) - \left(\frac{\log_{10} \hat{a}}{b}\right)} \quad (\text{Equazione 8})$$

- Per $Z < Z_{soglia}$

$$\hat{R} = 0$$

Si osserva che, nel caso in cui siano stati utilizzati i coefficienti FLORA (2012) la valutazione delle R in prossimità delle stazioni è

$$\hat{R} = 10^{\left(\frac{Z^*}{10b}\right) - \left(\frac{\log_{10} \hat{a}}{b}\right)} \quad (\text{Equazione 9})$$

Inoltre, i valori delle R corrispondenti alla sensibilità dello strumento, che si ricorda essere pari a -31.5, sono posti uguali a zero.

4. 4. Realizzazione dei campi di precipitazione

Attraverso l'utilizzo degli output prodotti dal metodo riferiti al giorno 21 sono stati ricostruiti i campi di precipitazione da radar.

Si è scelto di focalizzare l'analisi nelle sei ore dove l'evento, considerando la zona colpita nel suo insieme, ha avuto elevata intensità, ovvero dalle ore 15:00 alle ore 20:00

Il procedimento di creazione dei campi può essere riassunto in tre fasi principali:

- valutazione puntuale dei coefficienti in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica;
- interpolazione spaziale dei valori in prossimità di ogni stazione adoperando l'algoritmo IDW (*Inverse Distance Weighting*) tramite l'utilizzo del software *ArcMap*;
- realizzazione dei campi di pioggia adoperando la relazione inversa della relazione di potenza che intercorre tra Z e R.

Nei seguenti sotto-capitoli ulteriormente approfonditi i procedimenti realizzativi, le cui rappresentazioni sono inserite negli Allegati II e III.

4.4.1 Valutazione dei coefficienti a e b

In questa prima fase sono stati riprodotti graficamente, tramite l'ausilio di *ArcMap*, i risultati dei coefficienti a e b per ognuna delle sei ore selezionate dell'evento.

Sono stati introdotti nella rappresentazione anche le stazioni in cui l'evento ha colpito più intensamente e su cui si focalizza, nel sotto capitolo seguente, l'analisi dell'andamento dei coefficienti.

I pluviometri rappresentati sono i 239 strumenti rimasti dalla selezione del metodo ATS, comprensivi dei pluviometri di confine con la Liguria e con la Lombardia, che permettono una migliore visualizzazione e stima dell'evento.

Il vantaggio del metodo risiede nella possibilità di determinare, per ogni stazione pluviometrica, la coppia a , b che ottimizzi localmente la relazione tra Z - R , in modo da tenere conto della dipendenza degli eventi atmosferici da diversi fattori, quali la morfologia territoriale, l'urbanizzazione e le condizioni ambientali atte allo sviluppo delle perturbazioni.

Si nota, osservando le mappe presenti nell'Allegato II, come sia la distribuzione dei coefficienti segua l'orografia del territorio e la distribuzione dell'evento. Pluviometri vicini, infatti, presentano valori prossimi di coefficienti tra loro, dimostrando quanto la conformazione geomorfologica del territorio sia un fattore principe nella misura radar e negli eventi precipitativi.

Si può notare, nel caso delle ore 19, la presenza di valori estremamente elevati, sia di a sia di b , in corrispondenza della provincia di Torino. Nonostante la realizzazione di una prima "pulitura" dei dati, corrispondente alla eliminazione del 5% del valore più elevato, sono comunque rimasti circa 15 valori dell'ordine di 10^5 .

La causa principale della presenza di outlier è imputabile all'utilizzo di una finestra di taratura effettuata con passo dieci minuti, ovvero la frequenza di acquisizione degli strumenti che, nonostante presenti il vantaggio di ottimizzazione in fase operativa, rende la trattazione più sensibile ad errori strumentali o imprecisioni rappresentative delle misure a così breve scala.

4.4.1.1 Valutazione dei coefficienti a e b nelle stazioni più significative

Si è scelto di approfondire la valutazione dei coefficienti a e b in corrispondenza delle stazioni aventi valori più elevati registrati nella zona di esame.

Come si nota in figura 19, rappresentante le cumulate totali dell'evento proveniente dal Rapporto di Evento fornito da Arpa Piemonte, sono stati oltrepassati i 500 mm nei cinque giorni costituenti l'evento. La maggior parte di questi sono stati raggiunti nelle zone dell'Ovadese, Tortonese e Val d'Orba durante il giorno 21, come si può apprezzare dalla figura 20: nelle 24 ore sono stati registrati sia i valori pari alla metà del totale sia quelli caratterizzanti il totale delle cumulate.

Informazioni più dettagliate si possono ricavare dalla tabella rappresentata in figura 21, fornita da Arpa Piemonte, dove sono riportate le piogge giornaliere e la cumulata totale dell'evento in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica avente i valori più significativi durante l'evento. Si nota come i più elevati siano concentrati nella zona della provincia di Verbania e di Alessandria, dove nella giornata del 21 ottobre sono stati raggiunti valori straordinari, con minimi di 200 mm fino ai 479 mm in corrispondenza di Gavi.

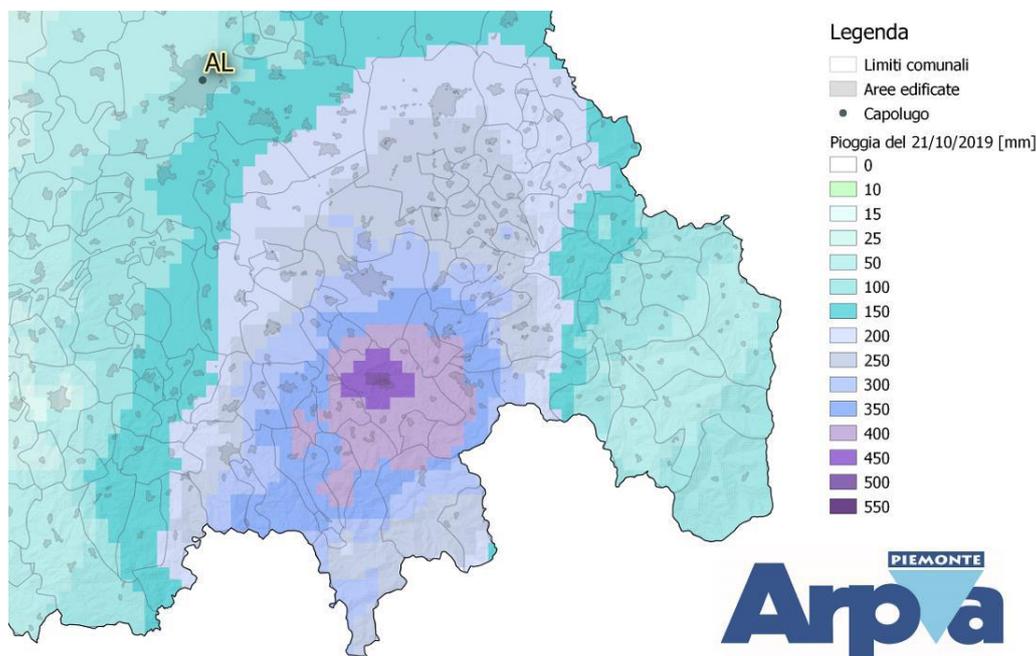


Figura 20 Precipitazione cumulata nelle 24 ore del giorno 21 ottobre (Fonte: Arpa Piemonte)

4. Applicazione tecnica adattiva nello spazio e nel tempo (ATS)

Zona di allerta	Bacino	Comune	Provincia	Stazione	19 ottobre	20 ottobre	21 ottobre	22 ottobre	23 ottobre	24 ottobre	Totale
A	TICINO	BOGNANCO	VB	LAGO_PAIONE	70.2	104.4	174.2	34.8	10	56	449.6
A	TICINO	VALSTRONA	VB	SAMBUGHETTO	47.2	126.6	177	28.8	3.2	59.8	442.6
A	TICINO	TRONTANO	VB	MOTTAC	45.8	97.8	166	39.2	6.8	38	393.6
A	TICINO	BOGNANCO	VB	PIZZANCO	49.6	103.8	149.2	25.4	9.6	49.2	386.8
A	TICINO	COSSOGNO	VB	CICOGNA	67.8	148.6	114.2	6.8	1.2	33.8	372.4
A	TICINO	CURSOLO-ORASSO	VB	CURSOLO	72.2	145.8	103.4	16.2	0.4	27.8	365.8
A	TICINO	MERGOZZO	VB	CANDOGLIA_TOCE	52.8	117.8	107.8	14.8	1.8	37.4	332.4
A	TICINO	PIEVE VERGONTE	VB	FOMARCO	38.8	65.8	159.8	17.4	5	40.4	327.2
A	TICINO	CESARA	VB	CESARA	44.2	131.4	89.2	3.6	2.4	43.8	314.6
A	TICINO	STRESA	VB	MOTTARONE_BAITA_CAI	47	123	97	4.2	1.6	40.8	313.6
B	SEZIA	SABBIA	VC	SABBIA	36.4	87.4	221.4	28.8	3.8	59.2	437
B	SEZIA	PIEDICAVALLO	BI	PIEDICAVALLO	12.4	71.4	166.2	22.4	7.2	76.4	356
B	SEZIA	FOBELLO	VC	FOBELLO	33.4	75.4	149.4	35.2	4.4	57	354.8
B	SEZIA	BIELLA	BI	OROPA	16.2	68.4	137	40.2	9.6	82	353.4
B	SEZIA	VARALLO	VC	VARALLO	38.4	137.4	85.8	29.2	2.8	53.4	347
B	SEZIA	TRIVERO	BI	CAMPARIENT	23	80	101	13.4	5	80.6	303
C	STURA DI LANZO	LANZO TORINESE	TO	LANZO_STURA_DI_LANZO	6.8	15.8	46.8	41.8	25	175.8	312
C	ORCO	SPARONE	TO	SPARONE	5.8	26.6	58.8	32	27.6	142	292.8
C	PO	CORIO	TO	PIANO_AUDI	7.6	15	37.2	35.4	38.6	154	287.8
C	STURA DI LANZO	VARISELLA	TO	VARISELLA	6.2	16.6	32.8	28.4	28.8	156.8	269.6
C	PO	LANZO TORINESE	TO	LANZO	6	15	33	17.4	26.8	156.2	254.4
C	STURA DI LANZO	MONASTERO DI LANZO	TO	CHIAVES	8.2	11.6	36.8	30.8	26.2	118	231.6
D	PELLICCE	ANGROGNA	TO	VACCERA	8.6	13.4	29.4	9	48	65.8	174.2
D	PELLICCE	LUSERNA SAN GIOVANNI	TO	LUSERNA_S_GIOVANNI	7.2	14	30.2	7.4	32	80.2	171
D	PELLICCE	BOBBIO PELLICE	TO	COLLE_BARANT	2.6	12.8	23.2	15.2	70.6	40.4	164.8
D	ALTO PO	CRISSELO	CN	PIAN_GIASSET	2	24	34.8	6.4	55.6	39.6	162.4
G	TANARO	GAVI	AL	GAVI	14.6	54.4	479.6	5.8	0.2	25	579.6
G	TANARO	CASALEGGIO BOIRO	AL	LAVAGNINA_LAGO	25.6	45.2	409.2	12.6	1.8	23.8	518.2
G	TANARO	BOSIO	AL	BRIC_CASTELLARO	13	30.8	369.8	7.8	0	23.2	444.6
G	TANARO	SASSELLO	SV	PIAMPALUDO	127.8	29	186.4	39.8	4.4	46.6	434
G	TANARO	CALIZZANO	SV	SETTEPANI	58.6	243	42.8	26.6	4.2	43.4	418.6
G	TANARO	CAIRO MONTENOTTE	SV	MONTENOTTE_INFERIORE	99.6	199.4	62	7	3.4	43.4	414.8
G	TANARO	OSIGLIA	SV	OSIGLIA	37.4	198.2	40.4	24.4	5.4	41.2	347
G	TANARO	NOVI LIGURE	AL	NOVI_LIGURE	4.8	39.8	234	4.4	0	20.6	303.6
H	SCRIVIA	ARQUATA SCRIVIA	AL	ARQUATA_SCRIVIA	22.2	68.2	367	2.4	0.6	30.8	491.2
H	SCRIVIA	SARDIGLIANO	AL	SARDIGLIANO	11.2	51.6	300.8	1.6	0	25.4	390.6
H	SCRIVIA	FRACONALTO	AL	FRACONALTO	76.2	39.2	203.2	11.8	0.8	31.6	362.8
H	SCRIVIA	CASTELLANIA	AL	CASTELLANIA	6.6	51.8	265.6	1.6	0.6	27.4	353.6

Figura 21 Totali di pioggia nelle stazioni più significative (Fonte: Arpa Piemonte)

A fronte di queste valutazioni, si è deciso di focalizzare l'analisi in corrispondenza di:

- Gavi (AL)
- Arquata Scrivia (AL)
- Lavagnina Lago (AL)
- Rossiglione (GE)

Per ognuna di queste stazioni si è studiato l'andamento dei coefficienti per ogni ora dell'intervallo temporale considerato, con il tentativo di comprendere l'esistenza di un eventuale andamento comune e sondare la validità dei risultati, come si può osservare nelle figure 23,25,27,29.

Inoltre, sono riportati gli ietogrammi e le linee di possibilità pluviometrica per la determinazione del tempo di ritorno provenienti dal rapporto di evento di Arpa Piemonte. (figura 22, 24, 26, 28).

Si può notare come i tempi di ritorno superino i 50 anni per intervalli temporali maggiori di 6 ore.

Stazione di Gavi (AL)

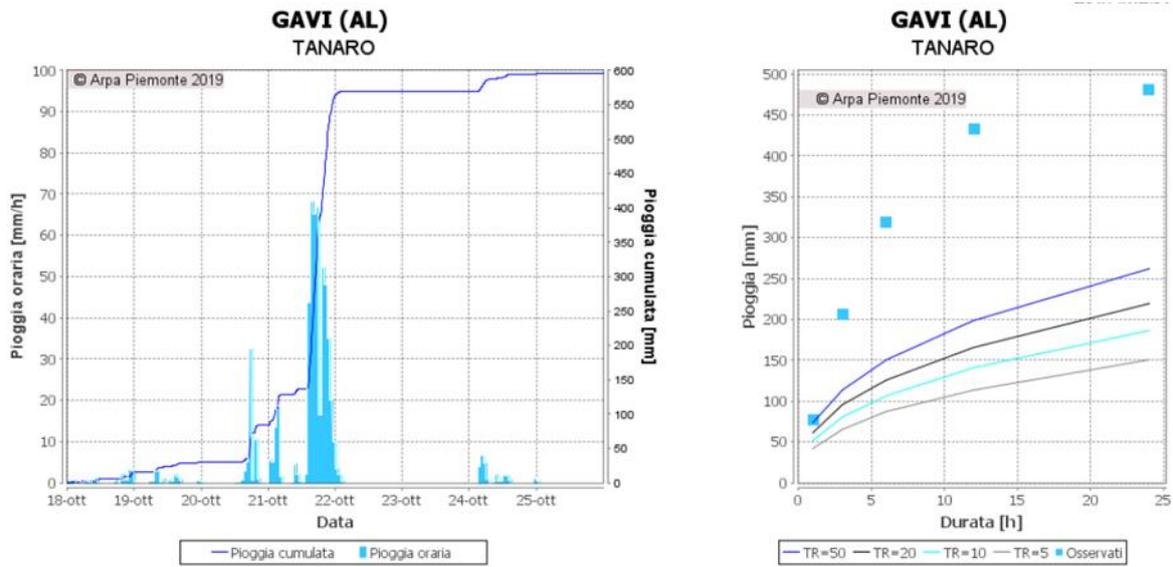


Figura 22 Ietogramma della stazione di Gavi (AL) e linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per la determinazione del tempo di ritorno del fenomeno. (Fonte: Arpa Piemonte)

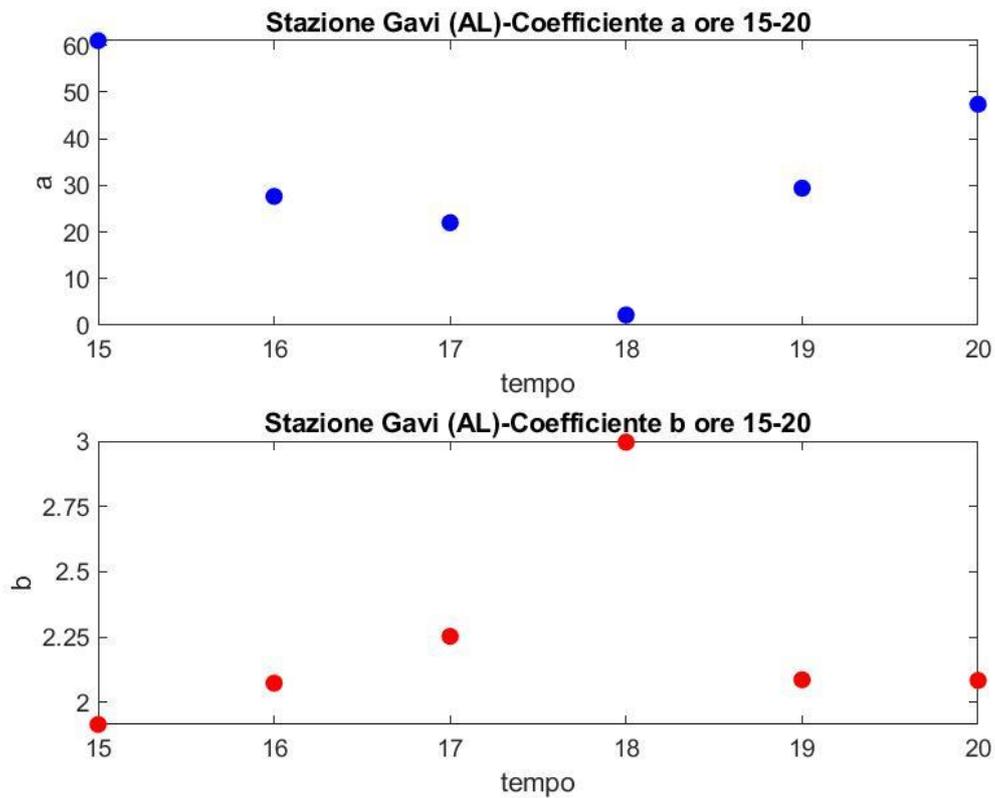


Figura 23 Andamento temporale dei coefficienti a e b nella stazione di Gavi (AL)

Stazione di Arquata Scrivia (AL)

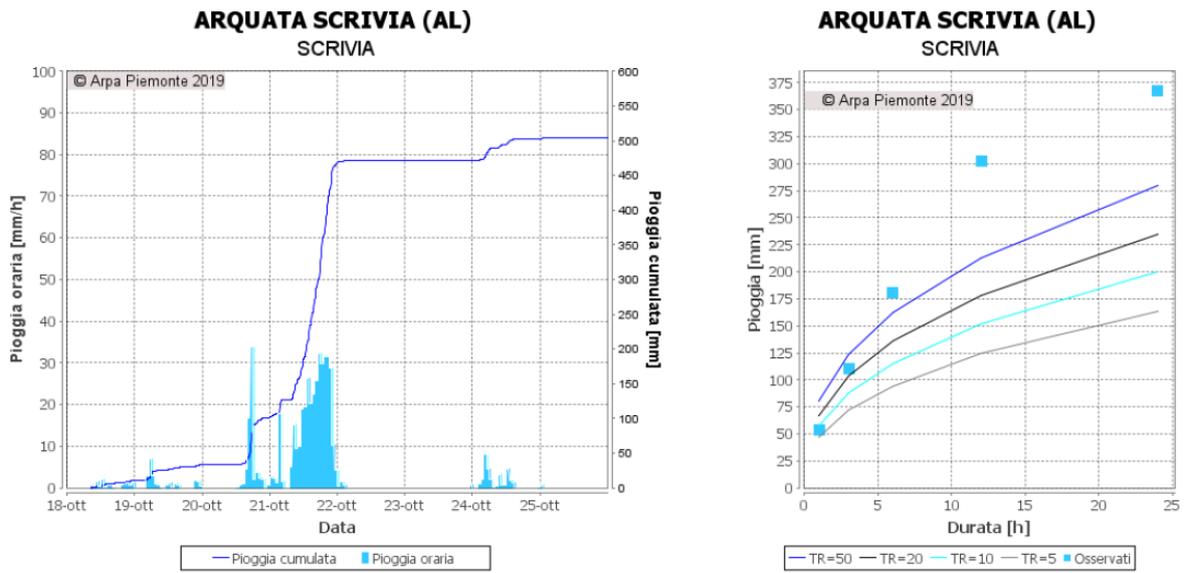


Figura 24 Ietogramma della stazione di Arquata Scrivia (AL) e linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per la determinazione del tempo di ritorno del fenomeno. (Fonte: Arpa Piemonte)

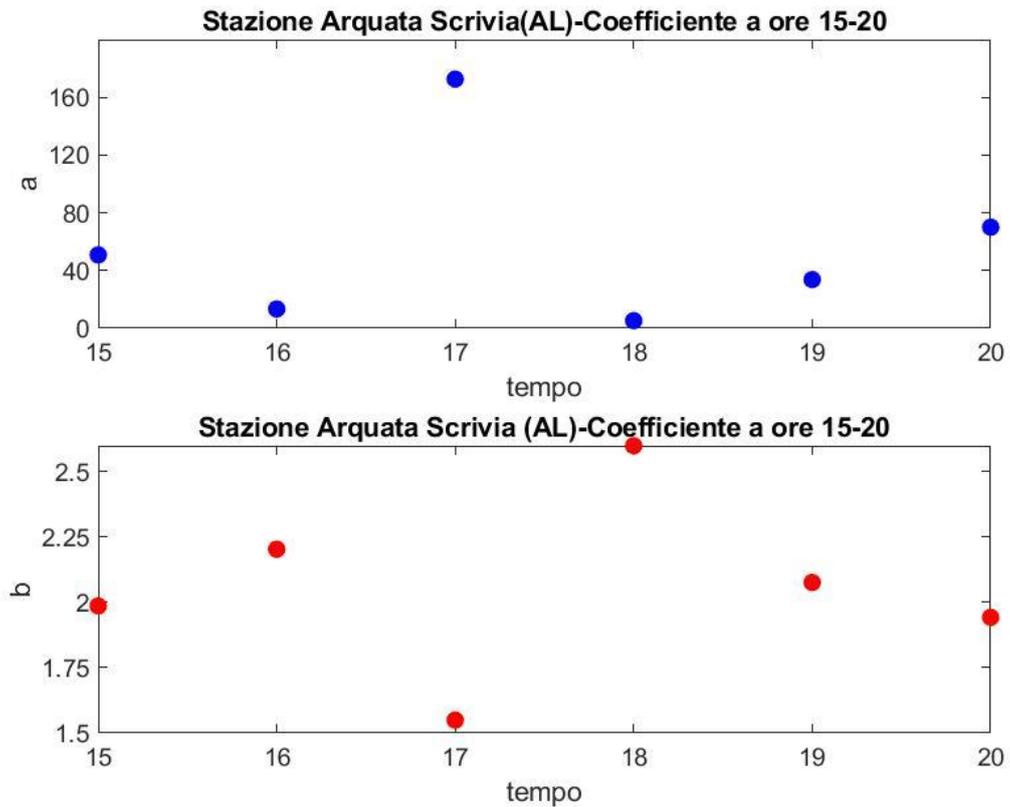


Figura 25 Andamento temporale dei coefficienti a e b nella stazione di Arquata Scrivia (AL)

Stazione di Lavagnina Lago (AL)

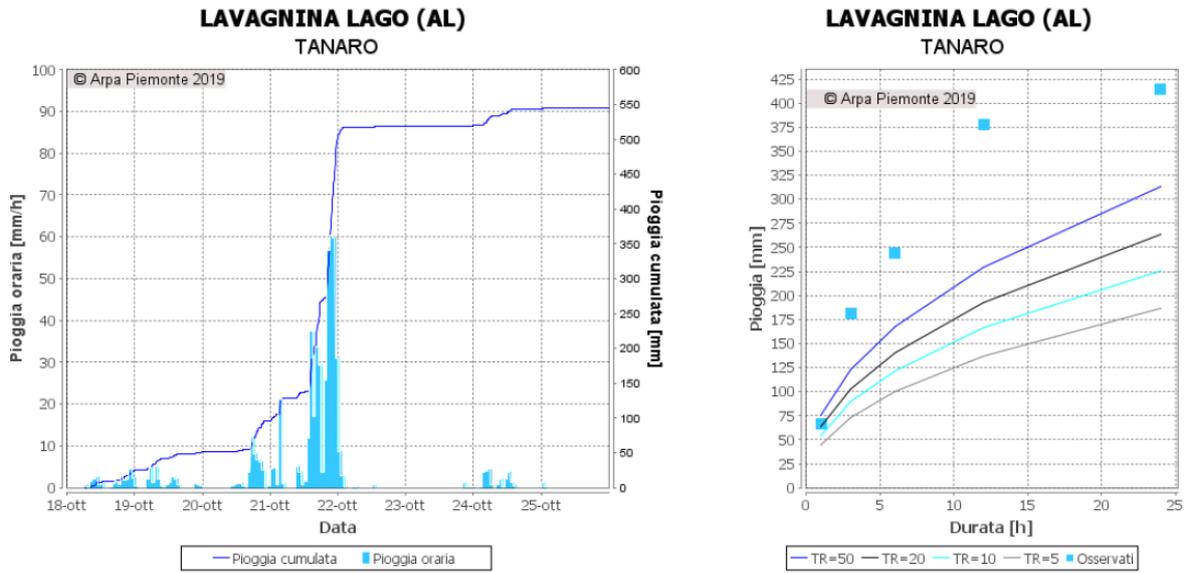


Figura 26 Ietogramma della stazione di Lavagnina Lago (AL) e linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per la determinazione del tempo di ritorno del fenomeno. (Fonte: Arpa Piemonte)

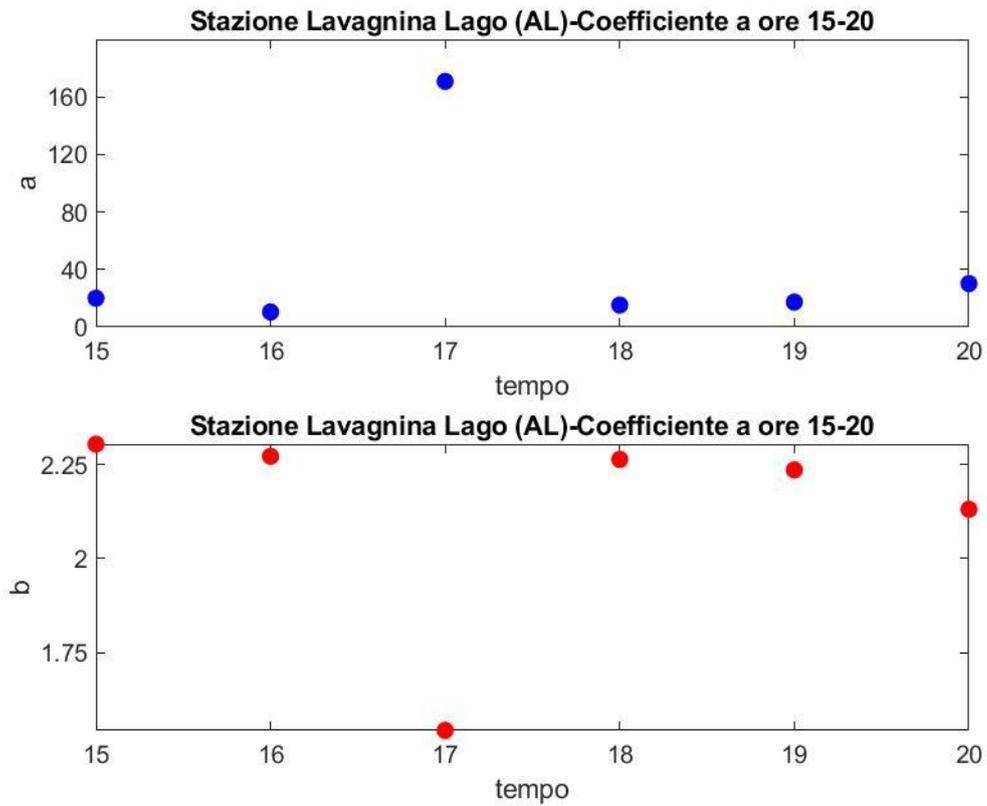


Figura 27 Andamento temporale dei coefficienti a e b nella stazione di Lavagnina Lago (AL)

Stazione di Rossiglione (GE)

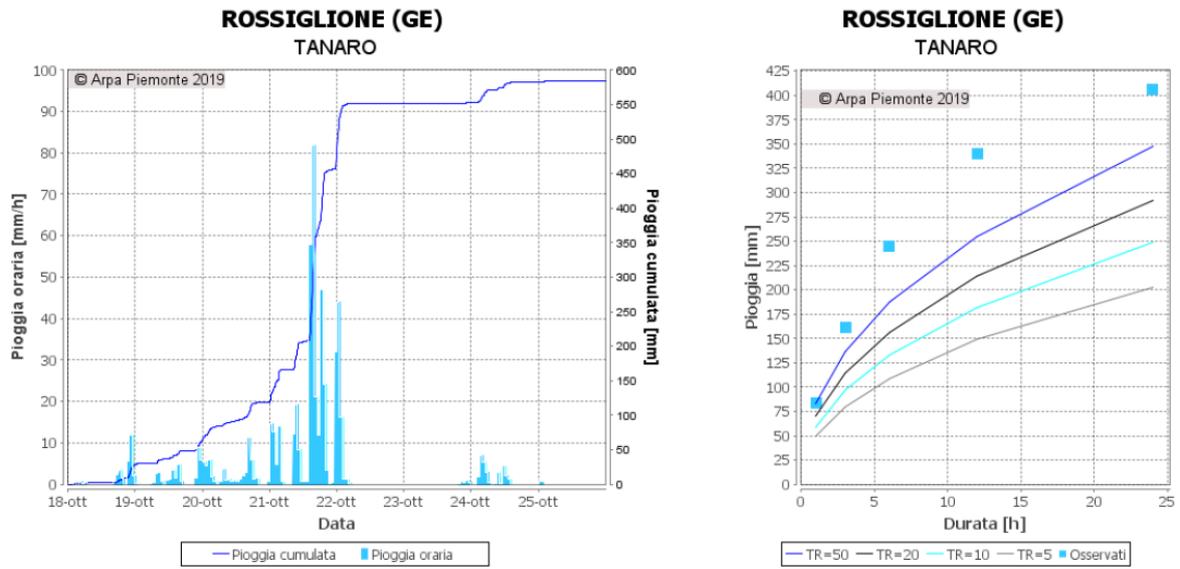


Figura 28 Ietogramma della stazione di Rossiglione (GE) e linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per la determinazione del tempo di ritorno del fenomeno. (Fonte: Arpa Piemonte)

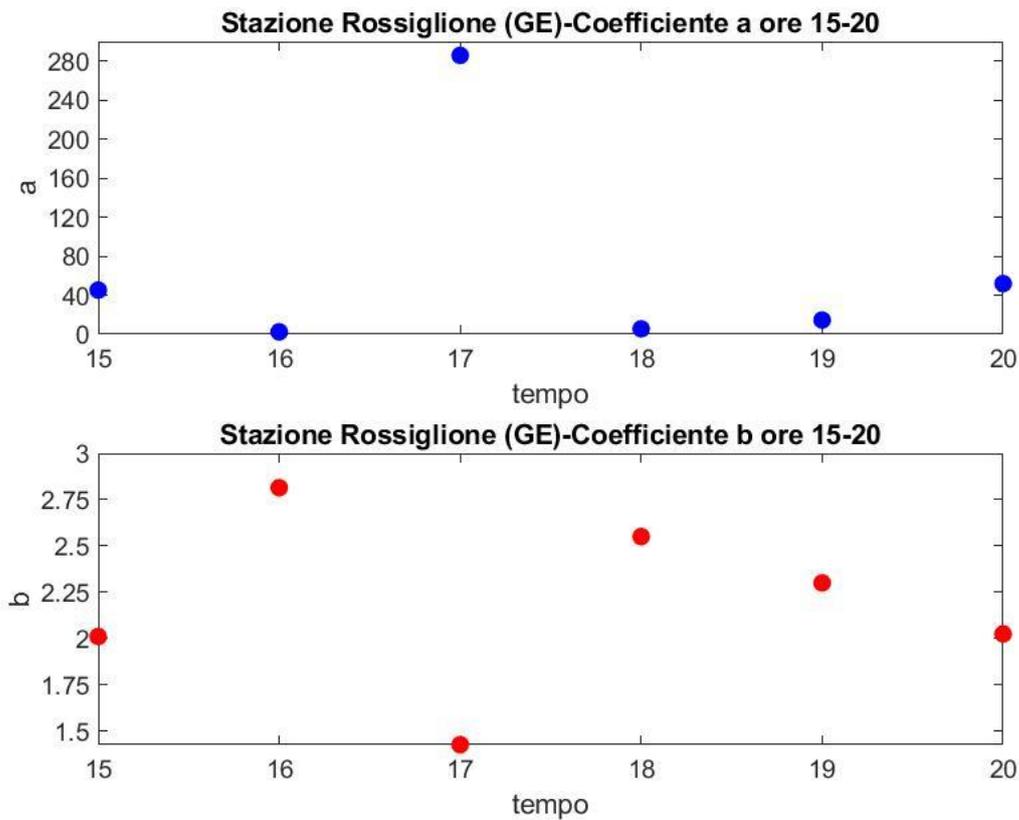


Figura 29 Andamento temporale dei coefficienti a e b nella stazione di Rossiglione (GE)

4.4.1.2. Valutazione complessiva delle coppie a e b

Per poter avere una comprensione complessiva dell'andamento dei coefficienti sono stati rappresentati i risultati in un piano (a, b) .

Si nota come la maggior parte dei valori di b si concentri in un intervallo compreso tra 1.9 e 2.3, assumendo quindi valori relativamente più piccoli rispetto a quello proposto dal progetto FLORA (2012).

La distribuzione del coefficiente a è principalmente inclusa in un range compreso tra 10 e 70.

Entrambi i coefficienti presentano valori estremi sia inferiormente sia superiormente, come si può osservare in figura 30. Infatti, in corrispondenza delle ore 17:00 in prossimità delle stazioni di Lavagnina Lago, Rossiglione e Arquata Scrivia assumono valori estremamente elevati di a (compreso tra 170 e 280) e molto bassi di b (tra 1.4 e 1.55). Scenario opposto si presenta in corrispondenza del pluviometro di Gavi alle ore 18:00 dove si registra un a pari a circa 2 e b è prossimo a 3.

Nella fase di ricerca dei coefficienti di primo tentativo, vale a dire quelli che meglio descrivono la relazione che intercorre tra Z e R , si realizza una regressione non lineare nel piano $\{Z, \log(R)\}$, sfruttando il criterio dei minimi quadrati degli scarti su R . Avendo focalizzato l'analisi nelle ore più intense dell'evento sono presenti valori di R estremamente elevati: nelle tre stazioni, precedentemente citate, si nota come la funzione riesca a raggiungere anche le coppie di punti più elevati, portando alla definizione di valori di a elevati e di b inferiori. Invece, nel caso della stazione di Gavi la distribuzione dei punti, nonostante la presenza di valori di R alti, ha un profilo tale da non essere raggiunto dalla curva di interpolazione, generando valori inferiori rispetto alle altre. Dunque, in corrispondenza di questa stazione, è presente una sottostima dei coefficienti a ed una relativa sovrastima dei coefficienti b .

Si noti che questa problematica si verifica nelle ore successive anche per gli altri pluviometri, causando dunque una stima non perfettamente coerente con la metodologia applicata.

In più, i valori molto prossimi assunti dai coefficienti, in corrispondenza sia della stazione di Lavagnina Lago sia di Arquata Scrivia, sono dovuti alla presenza degli stessi pluviometri attivi valutati nel medesimo intervallo temporale, causando una somiglianza fra le coppie esistenti nella regressione che genera una curva di fitting molto simile.

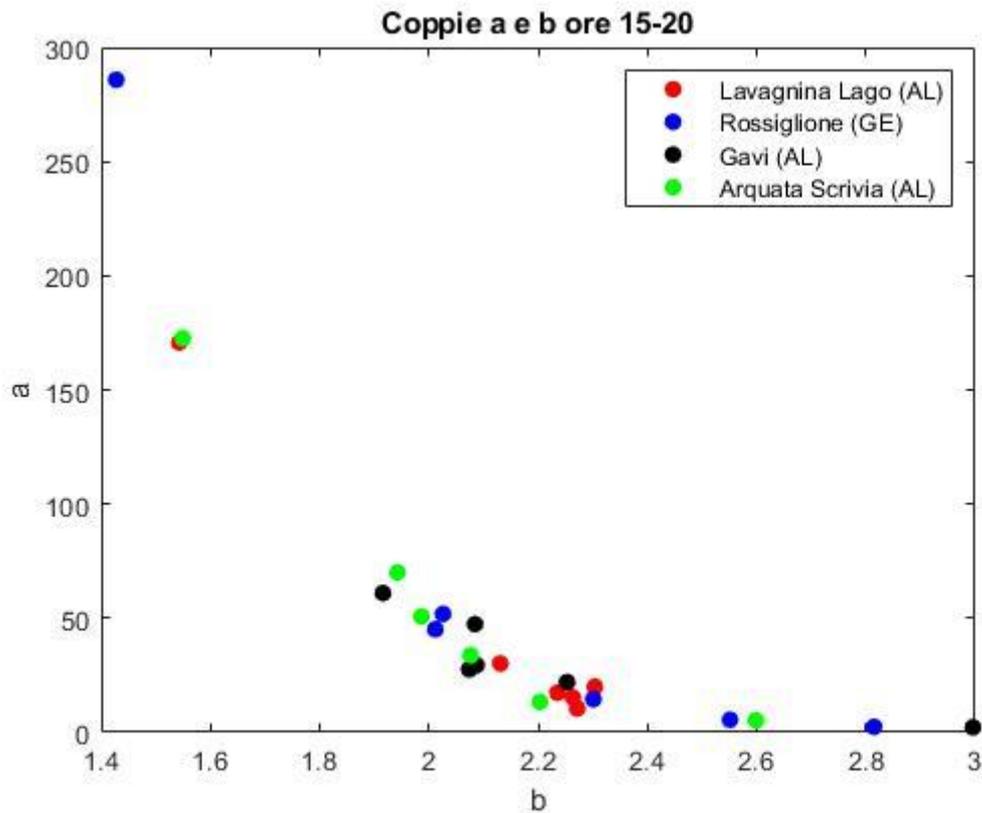


Figura 30 Rappresentazione nel piano(a,b) dei coefficienti nelle sei ore dell'evento per ogni stazione pluviometrica in esame

4.4.2 Interpolazione spaziale dei coefficienti a e b adoperando l'algoritmo IDW

Il passo successivo della trattazione nella realizzazione dei campi di pioggia è stato effettuare una visualizzazione spaziale dei coefficienti a e b . Infatti, lo scopo principale è quello di poter ricavare, grazie all'ausilio di uno strumento altamente tecnologico come il radar, in ogni punto della regione indagata sia i coefficienti sia i valori di R .

Per poter utilizzare in maniera consona la relazione inversa che lega la riflettività Z , fornita, grazie ai prodotti radar, per ogni cella, con la precipitazione R è stato necessario effettuare delle interpolazioni nello spazio dei coefficienti.

Per poter effettuare questa fase operativa, è stato adoperato il software *ArcMap*.

Si sottolinea come, in questa rappresentazione, pluviometri vicini assumano valori prossimi tra loro, confermando la dipendenza dei coefficienti dall'orografia territoriale e dalle condizioni ambientali, generatrici degli eventi precipitativi. In generale si osserva una continuità di valori nella zonazione, con la presenza di una transizione non troppo netta tra i vari valori delle aree. Sono presenti, in certi casi, zone in cui si hanno valori isolati, differenti da quelli registrati nell'intorno.

In particolare, si nota come in prossimità delle ore 19 sia presente una forte concentrazione di valori spazialmente concentrati nella provincia di Torino, a causa della presenza degli outlier precedentemente descritti.

Si riportano nell'Allegato III le rappresentazioni grafiche ottenute per ogni ora.

4.4.3 Realizzazione dei campi di pioggia

Per la realizzazione della fase finale è necessario adoperare i risultati delle fasi precedenti, in modo da poter rappresentare in ogni punto della mappa i valori della precipitazione stimata.

Infatti, in ogni punto vale la relazione seguente:

$$\hat{R} = 10^{\left(\frac{Z^* - Z_{soglia}^*}{10\hat{b}}\right) - \left(\frac{\log_{10}\hat{a}}{\hat{b}}\right)} \quad (\text{Equazione 10})$$

Dove

- \hat{a} : coefficiente a orario stimato in ogni cella grazie all'interpolazione spaziale;
- \hat{b} : coefficiente b orario stimato in ogni cella grazie all'interpolazione spaziale;
- Z : valore di riflettività orario.

Dunque, per ogni ora è necessario inserire all'interno della precedente relazione i valori corrispondenti ad ogni punto della mappa.

Per quanto riguarda quelli relativi a a e b si inseriscono quelli ottenuti dalle valutazioni con l'interpolazione IDW, precedentemente illustrate.

Utilizzando i prodotti SRI, viene effettuata una conversione tramite l'utilizzo dei coefficienti di Marshall & Palmer (1948) in modo da ottenere, ogni 10 minuti, i valori di Z .

$$Z = 200R^{1.6} \quad (\text{Equazione 11})$$

Successivamente, si effettua, per ogni cella, una media dei valori corrispondenti ai sei intervalli, in modo da ottenere un valore mediato delle Z e avere una corretta corrispondenza con gli altri valori da inserire nella valutazione delle R .

Dopo aver realizzato questi passaggi e aver creato i file *.tif* corrispondenti alle matrici spaziali, attraverso il software *Matlab* è stato possibile ricreare una visualizzazione grafica in *ArcMap*.

Per poter apprezzare in maniera immediata i campi di pioggia creati in questo modo è stata utilizzata una rappresentazione grafica di confronto con i corrispettivi realizzati utilizzando i soli dati da pluviometri.

Questi ultimi, per coerenza di trattazione, sono stati interpolati anch'essi con la modalità IDW del software *ArcMap*.

4.5. Risultati

Per poter effettuare una corretta valutazione del funzionamento del metodo ATS nella creazione dei campi di pioggia è stato scelto di rappresentarli attraverso un confronto diretto con i corrispettivi campi realizzati adoperando solamente un'interpolazione dei dati pluviometrici.

Nella valutazione dei campi si è notato una generale alternanza tra sottostima e sovrastima dei valori ottenuti comparati con quelli ricavati dall'interpolazione IDW.

Alle ore 15, (figura 32), ora in cui ha inizio il transito e relativa permanenza del temporale a V nel Piemonte sud-orientale, si riscontra una buona corrispondenza tra le due tipologie di campi realizzati.

Nelle zone settentrionali del Piemonte i campi stimati da radar sono lievemente più elevati rispetto a quelli osservati; situazione opposta si verifica nel Torinese, dove si nota una generale sottostima.

Nelle zone del basso Alessandrino, invece, si nota come il radar sia estremamente rappresentativo dell'evento in esame: si riesce ad apprezzare il profilo del fronte temporalesco, riuscendo a distinguere le zone più intense da quelle meno acute, con gradualità realistica. Al contrario, nella rappresentazione dei campi osservati, nelle zone di confine del fronte si registrano valori prossimi a zero nelle stazioni, non corrispondenti alla realtà.

Nelle zone vicine alla stazione di Rossiglione e nella zona meridionale al confine con la Lombardia, si osserva la capacità del radar di rilevare le celle convettive: nella ricostruzione si nota un incuneamento di intensi scrosci temporaleschi tra i pluviometri che, non essendo interessati, registrano valori minori.

Alle ore 16, (figura 33), dai campi di precipitazione realizzati da radar si può apprezzare la traslazione verso est descritta dal Rapporto di evento di Arpa Piemonte, come la presenza di intense celle convettive.

Nuovamente, nelle zone del Verbano e del Biellese, si verifica una sovrastima dei campi di precipitazione ricostruiti da radar. Nonostante ciò, si riesce però ad apprezzare una realistica distribuzione spaziale dell'evento, che riesce a giustificare i valori osservati dagli strumenti a terra. Questo non avviene nel caso delle precipitazioni osservate, dove si visualizzano i valori isolati dei pluviometri, senza una particolare gradualità rappresentativa.

In prossimità della zona su cui si è focalizzata l'attenzione del lavoro di tesi, si osserva la prosecuzione dei fronti temporaleschi verso la Lombardia Orientale ed il loro incunarsi tra i pluviometri della rete, raggiungendo valori superiori ai 30 mm non captati dai pluviometri. Nei pressi di Gavi si nota come sia presente una spazializzazione delle precipitazioni, con la loro graduale intensità, che tende ad assumere caratteristiche vicine al rapporto di evento analizzato.

In prossimità delle ore 17,(figura 34), a differenza delle ore precedenti, si riesce ad apprezzare una coerenza maggiore tra i campi osservati e quelli ricostruiti, in particolar modo nella provincia di Torino.

Nonostante ciò, si nota come persista una leggera sovrastima del radar in prossimità delle zone settentrionali del Piemonte, al contrario delle valli di Lanzo dove si rileva una sottostima del radar.

Nelle zone del basso Alessandrino si continua ad osservare una concentrazione delle celle convettive in direzione della Lombardia, e si nota il motivo della rilevazione di valori inferiori nei campi di precipitazioni osservati: il fronte sfiora certe stazioni, che osservano valori minori e non rappresentativi del reale scroscio che si verifica a poca distanza. In queste zone si nota come la maggior parte delle stazioni nell'intorno di Gavi siano completamente investite dall'evento, con le stime da radar maggiori rispetto a quelle osservate.

Alle ore 18, (figura 35), si rileva la capacità dei campi ottenuti da radar di possedere una migliore coerenza con la realtà, a differenza del caso delle osservate dove si nota in maniera più marcata l'utilizzo di un metodo interpolante.

Queste considerazioni si effettuano soprattutto nella visualizzazione dell'avanzamento del fronte in prossimità dell'Alessandrino, dove si riesce a rilevare un ingrossamento rispetto all'ora precedente, ed una distribuzione più realistica delle precipitazioni con zone da esse circondate, ma non toccate.

Nella zona settentrionale del Piemonte si riescono ad osservare delle celle convettive comprese tra pluviometri, che nel caso osservato non si riescono ad apprezzare. Persiste una sottostima delle precipitazioni valutate da radar in prossimità delle Valli di Lanzo.

Alle ore 19, (figura 36), si registra una leggera sottostima delle precipitazioni da radar sia in prossimità delle valli di Lanzo sia nel Novarese.

Al contrario delle ore precedenti, in questo caso è presente una corrispondenza valida tra ciò che è osservato e ciò che è stimato.

Nel basso Alessandrino si nota l'isolamento da parte della perturbazione delle zone al confine meridionale con la Lombardia, a causa della sua traslazione verso l'arco Alpino, che genera in corrispondenza del Pavese valori, da radar, molto più intensi del caso osservato.

Nella zona compresa tra Gavi e Ovada le precipitazioni ricostruite da radar sono particolarmente elevate con la presenza di intensi centri di scroscio.

Alle ore 20, (figura 37), si nota una ottima corrispondenza tra i due campi, grazie allo spostamento generale delle perturbazioni.

Nell'Alessandrino si continua ad apprezzare il movimento dei fronti, con la nascita di piccole appendici generate dallo spostamento, e la relativa variazione dei valori di precipitazione.

La ricostruzione dell'IDW si dimostra incapace di rappresentare al meglio il comportamento delle celle convettive, al contrario del radar: i pluviometri non riescono a registrare valori rappresentativi dalla perturbazione che non si scarica sempre sulle stazioni ma, molto spesso, tra di loro.

Come visto, è frequente la presenza di valori sovra-stimati o sotto-stimati del radar, come si può osservare dalla figura 31, dove sono rappresentati i valori delle precipitazioni stazione per stazione. Nonostante sia presente un indice R^2 sufficientemente buono ed un andamento prossimo alla bisettrice del piano, si registrano, sia a scala oraria, sia a scala cumulata nell'intervallo di tempo considerato, frequentemente valori che si distaccano.

In corrispondenza delle stazioni si verifica dunque, in certi casi, una sottostima forte delle precipitazioni ottenute da radar.

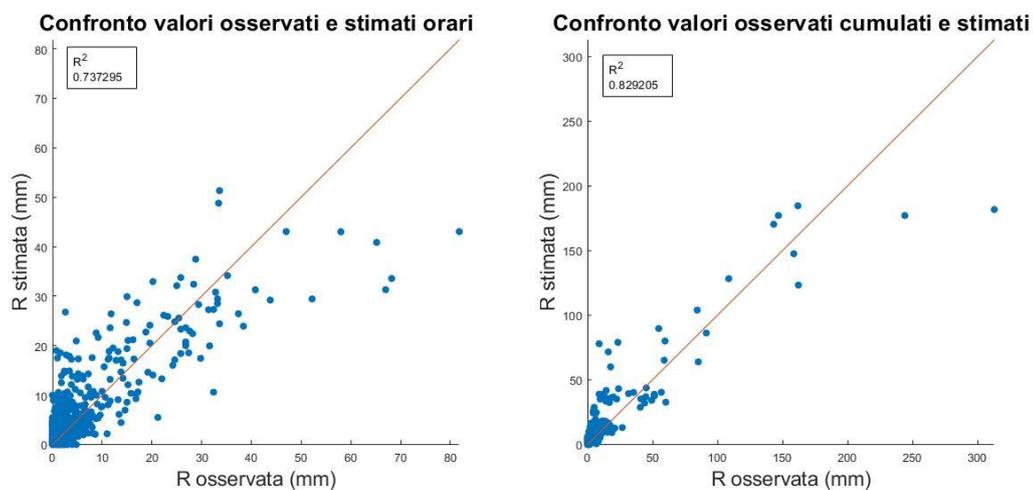


Figura 31 Confronto tra i valori osservati e stimati da radar per il caso in esame

Confronto R osservate e R stimate da radar tramite l'applicazione del metodo ATS
Giorno 21/10/2019 ore 15:00

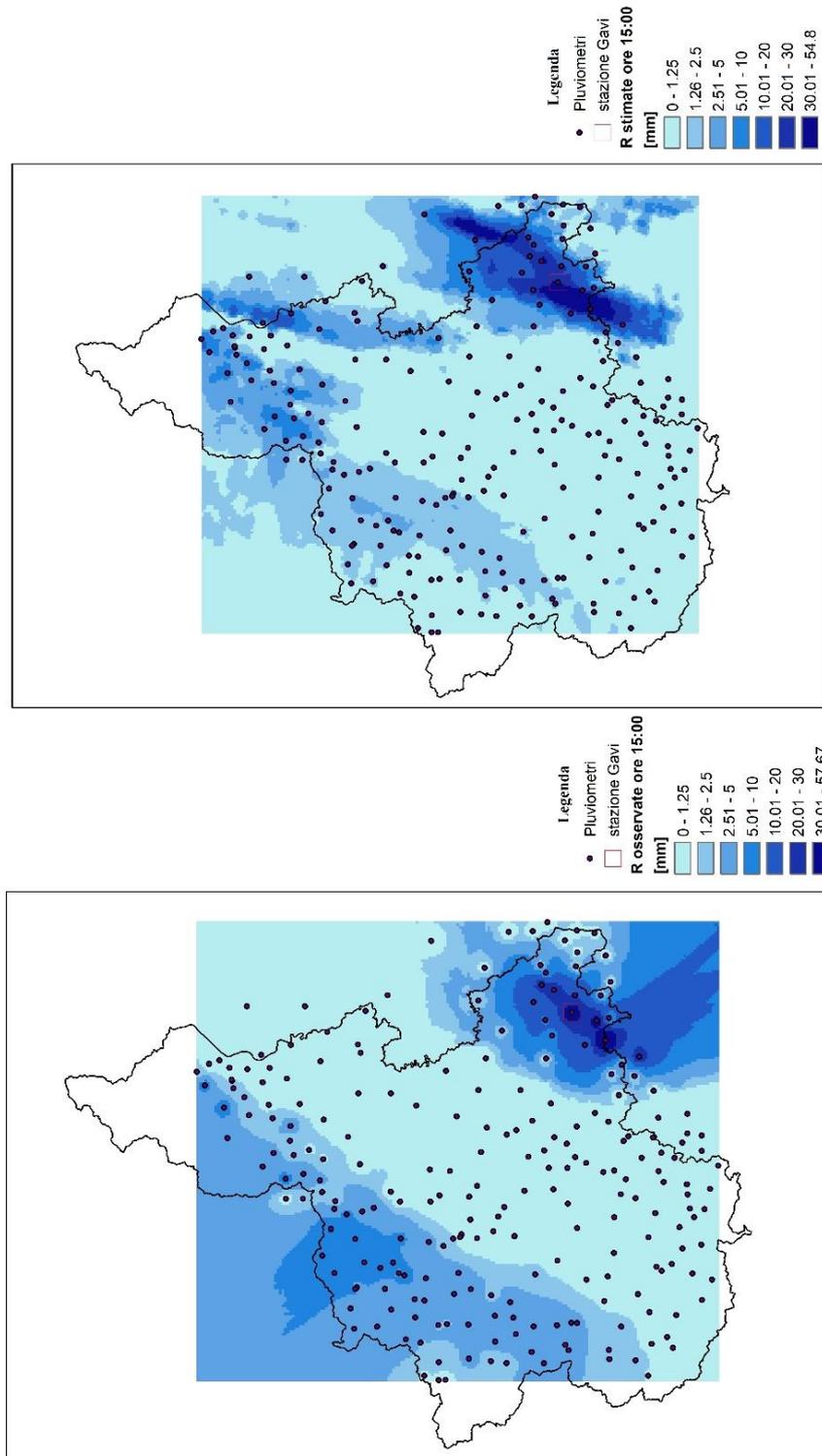


Figura 32 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 15:00

Confronto R osservate e R stimate da radar tramite l'applicazione del metodo ATS
Giorno 21/10/2019 ore 16:00

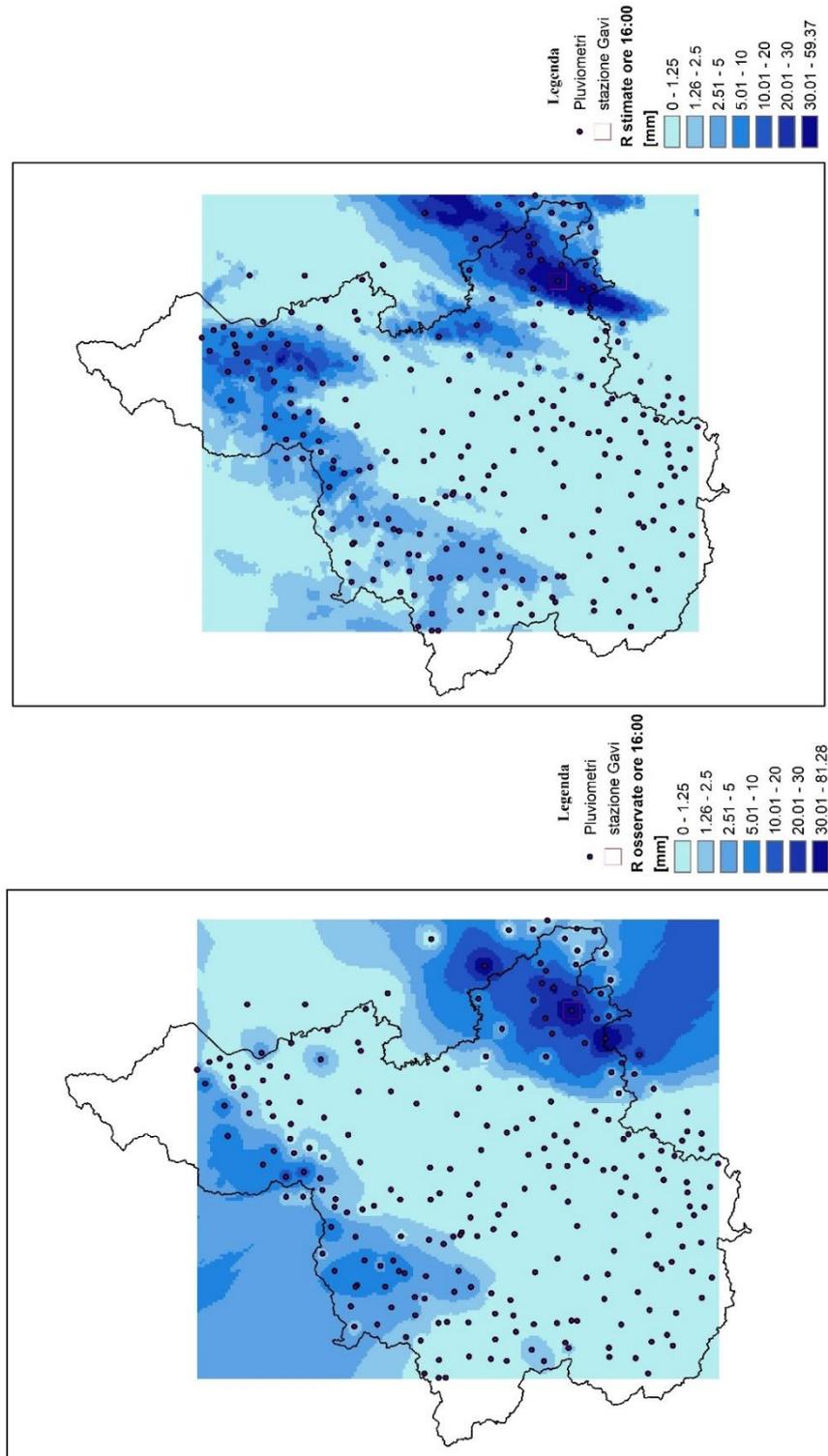


Figura 33 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 16:00

Confronto R osservate e R stimate da radar tramite l'applicazione del metodo ATS
Giorno 21/10/2019 ore 17:00

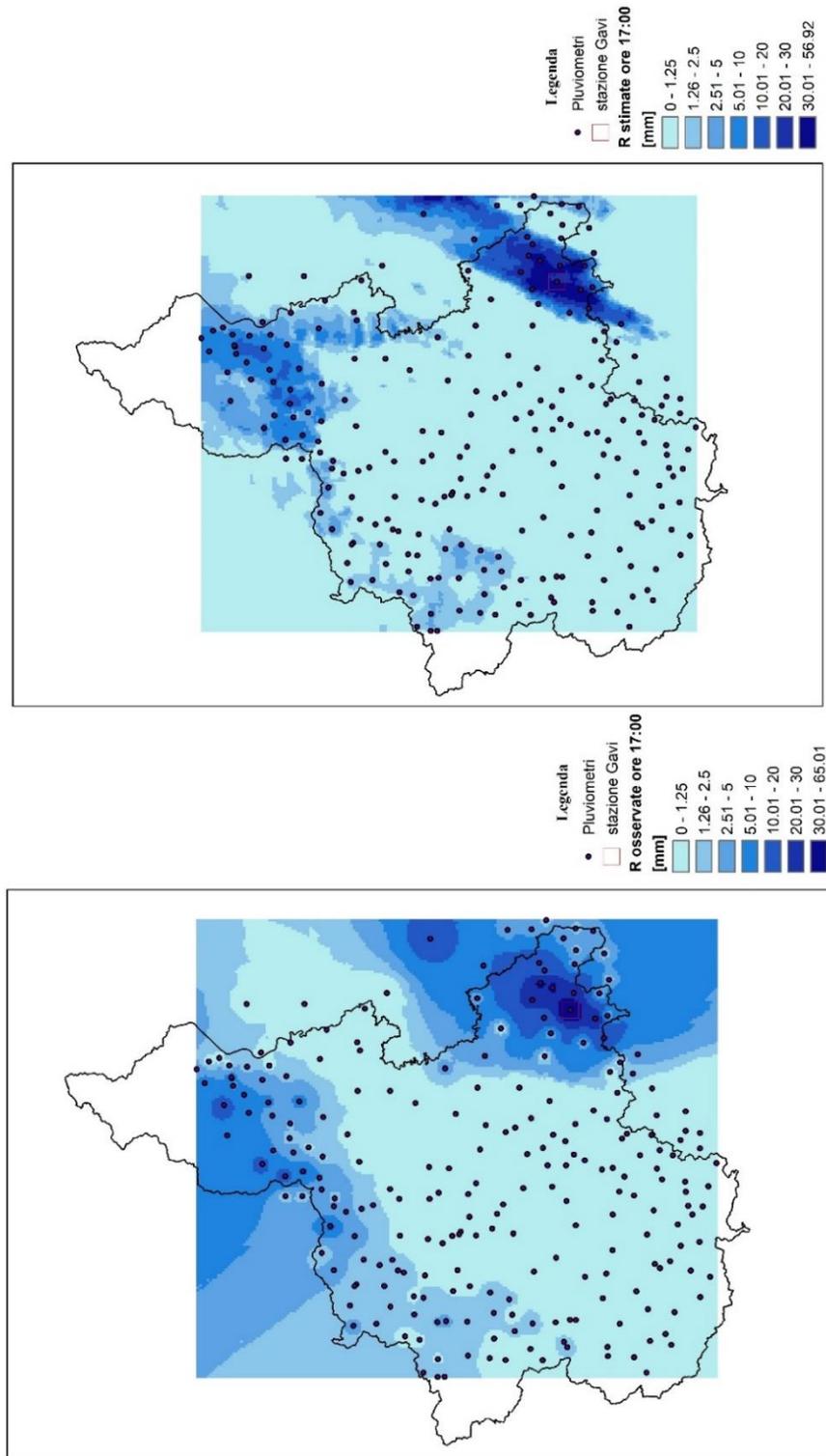


Figura 34 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 17:00

Confronto R osservate e R stimate da radar tramite l'applicazione del metodo ATS
Giorno 21/10/2019 ore 18:00

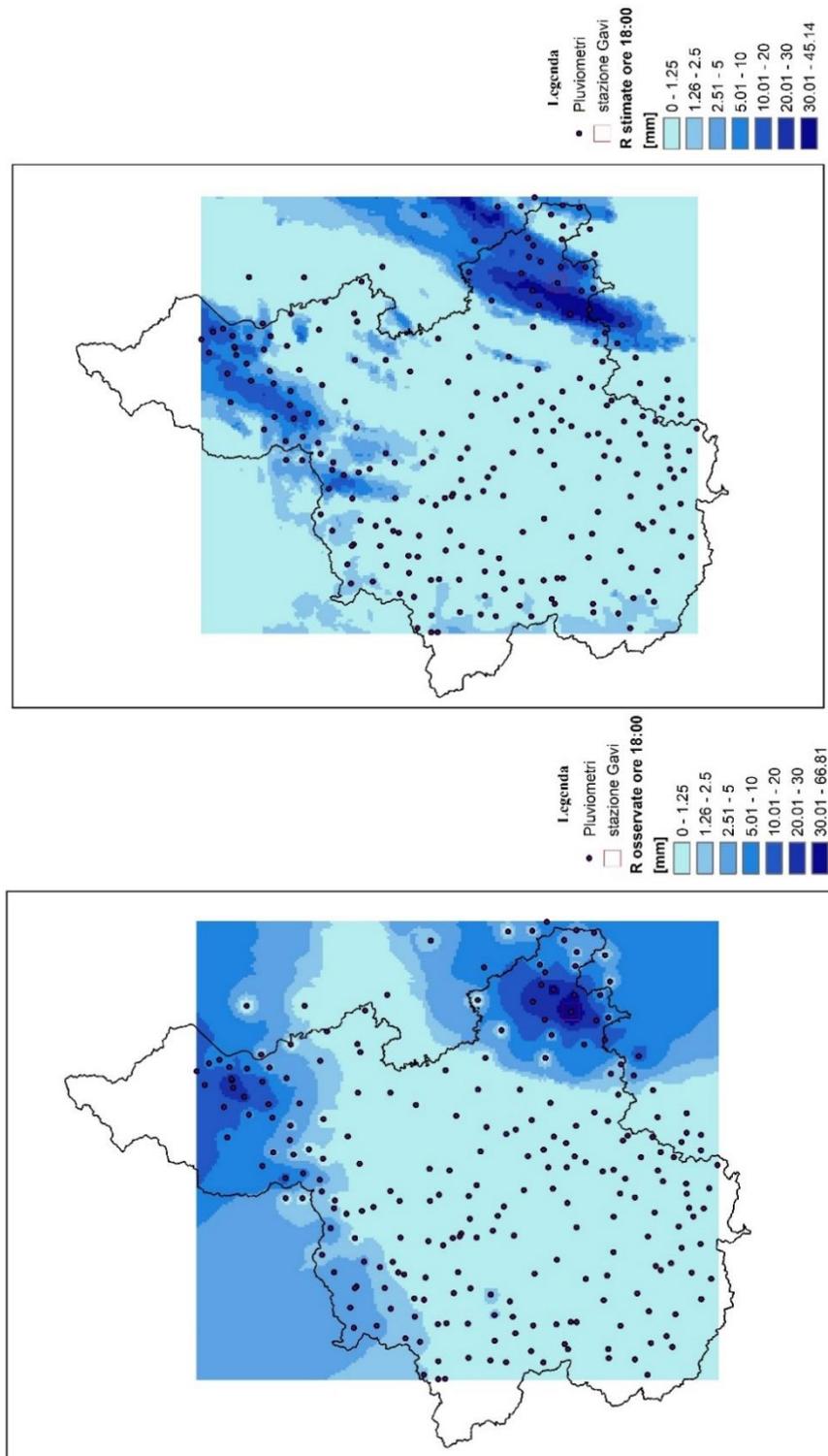


Figura 35 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 18:00

Confronto R osservate e R stimate da radar tramite l'applicazione del metodo ATS
Giorno 21/10/2019 ore 19:00

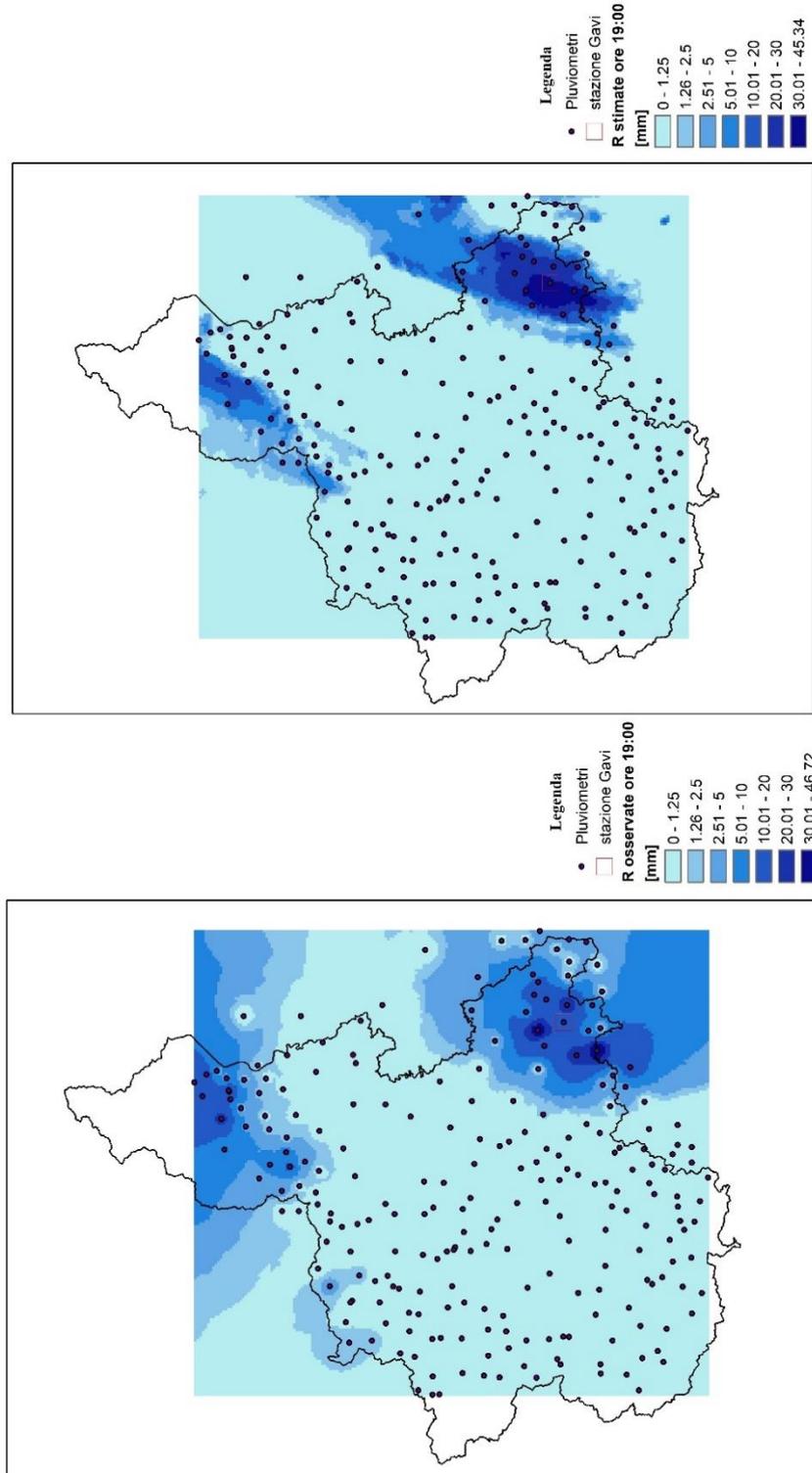


Figura 36 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 19:00

Confronto R osservate e R stimate da radar tramite l'applicazione del metodo ATS
Giorno 21/10/2019 ore 20:00

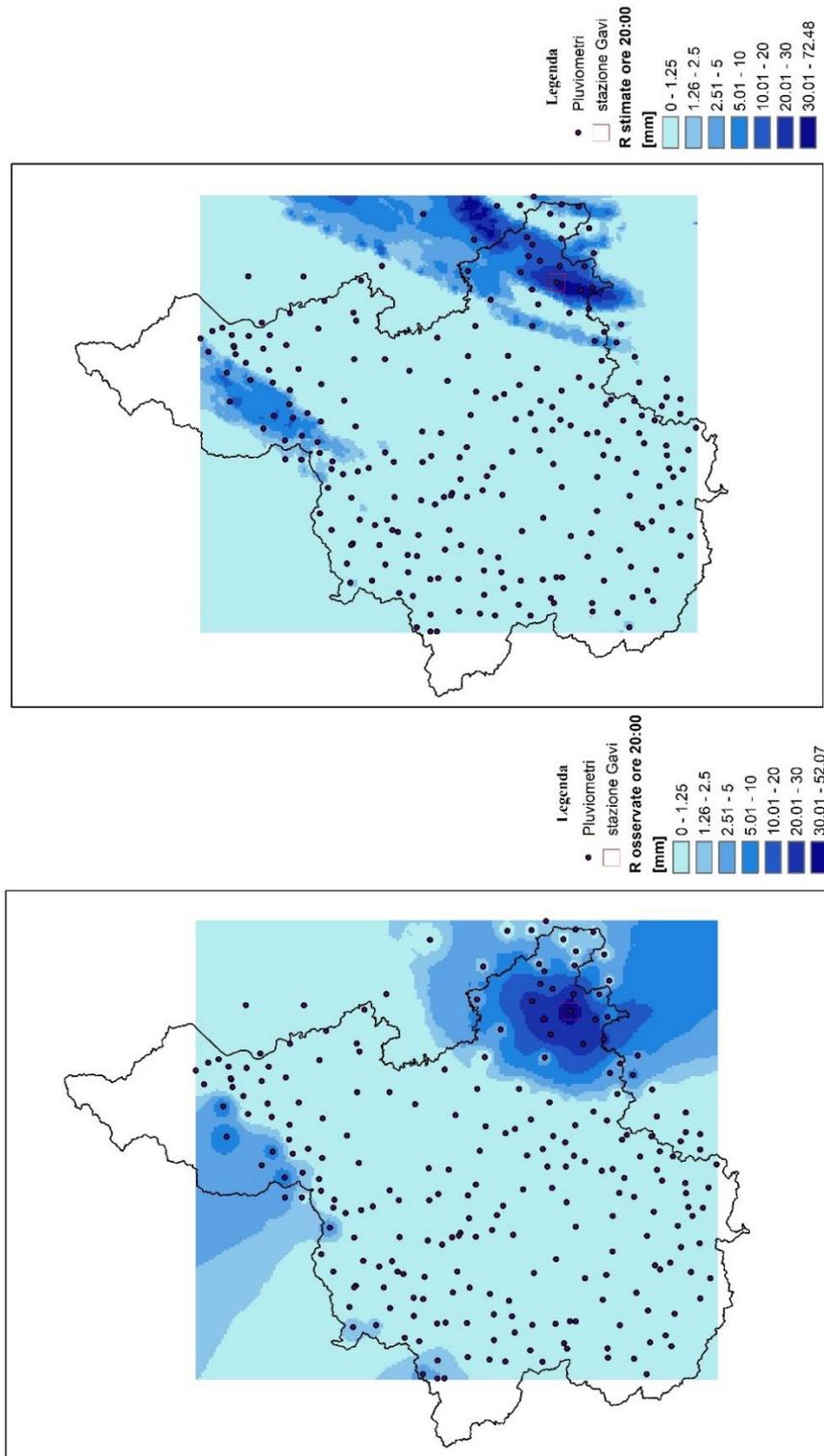


Figura 37 Confronto campi di precipitazione osservati e ricostruiti da radar - ore 20:00

5. Conclusioni

Nella recente ottica di gestione e controllo del rischio idrogeologico è necessario effettuare una nuova tipologia di modellazione idrologica, sfruttando l'elevata tecnologia degli strumenti a disposizione.

Il solo utilizzo della rete delle stazioni pluviometriche non fornisce informazioni sufficientemente dettagliate per poter essere adoperata nelle previsioni di eventi meteorologici importanti. È dunque necessario affiancarla ad una tecnologia orientata alla spazializzazione dei dati, in particolar modo nelle zone dove non è presente, o non è sufficientemente fitta, la strumentazione a terra.

Subentra in questo contesto di compartecipazione il radar meteorologico che, negli ultimi anni, sta assumendo un ruolo sempre più importante nella previsione degli eventi meteorologici e nel preannuncio di eventi alluvionali.

Nel lavoro di tesi è stata valutata l'uso accostato dei due strumenti nella ricostruzione dei campi di pioggia causati dalla violenta combinazione di due eventi convettivi, verificatosi nei territori del Piemonte Sud Orientale nell'ottobre del 2019. Per poter approfondire e limitare l'indagine al momento più significativo, sono state selezionate sei ore intense del giorno in cui si sono verificati i valori di picco delle precipitazioni. Infatti, lo scopo è stato di duplice entità: dapprima sondare il funzionamento della "Tecnica adattiva nello spazio e nel tempo (ATS)" in questo caso di evento convettivo estremo e, successivamente, ricostruire i campi di pioggia adoperando i risultati forniti.

La tecnica ATS, sviluppata da Libertino et al. (2015), fornisce, per ogni ora e per ogni stazione pluviometrica funzionante, sia una stima dei coefficienti della relazione di potenza, che lega le misure radar e la precipitazione, sia una stima delle precipitazioni.

Il calcolo di questi coefficienti è effettuato usando dei parametri calibrati in base alle misurazioni pluviometriche e ai corrispettivi valori di riflettività registrati dagli strumenti. In questo modo si riesce ad apprezzare la variabilità spazio-temporale di tale valutazione, che riesce a adattarsi ai fenomeni precipitativi in atto al momento della stima. Infatti, per ogni stazione si ha la possibilità di valutare i coefficienti adoperando i valori dei pluviometri attivi riconosciuti nella vicinanza, discriminati in base sia alla presenza o meno di precipitazione sia

alla valutazione della riflettività rispetto ad un valore soglia, utile ad eliminare il rumore dello strumento radar ed a limitare la sottostima delle informazioni.

Nell'analisi di tali coefficienti si nota come, per entrambi, sia presente l'influenza del posizionamento geografico delle stazioni: pluviometri vicini registrano, quasi sempre, valori simili.

Per comprendere i range di appartenenza dei coefficienti nel caso di eventi convettivi intensi, si è approfondito lo studio nelle stazioni in cui l'evento ha avuto il suo picco di intensità. Si è riscontrata una limitazione della tecnica in presenza di valori elevati delle coppie R-Z: questi, nella fase di *fitting* dei dati, non riescono ad essere raggiunti dalla curva di interpolazione. Si genera, così, una conseguente sottostima del coefficiente a ed una sovrastima del coefficiente b .

Infine, si evidenzia la presenza di outlier in corrispondenza delle ore 19:00: avendo utilizzato una finestra di taratura con passo 10 minuti, vale a dire la frequenza di acquisizione degli strumenti, si ha sia il vantaggio di avere vantaggi di ottimizzazione in fase operativa, ma si presenta la possibilità di avere valori estremamente alti a causa di errori strumentali o imprecisioni rappresentative delle misure a così breve scala.

Adoperando questi output del metodo, si è proceduto alla loro spazializzazione adoperando il criterio IDW (*Inverse Distance Weighting*), in modo da ricreare i campi di pioggia. Utilizzando la relazioni inversa della legge di potenza che lega la riflettività alla precipitazione, si sono ottenuti le precipitazioni stimate da radar in ogni punto della regione, così da procedere alla creazione, per ogni ora dell'intervallo preso in considerazione, dei campi di precipitazione.

Attraverso un confronto effettuato con i corrispettivi campi di precipitazione, realizzati con i soli dati pluviometrici forniti da Arpa Piemonte, si è compresa l'ottima coerenza con la realtà dei campi ricostruiti da radar. È possibile, infatti, apprezzare il profilo dei fronti temporaleschi, distinguendo le zone più intense con realistica gradualità.

Inoltre, si nota come l'introduzione dei dati radar permetta di evidenziare l'incapacità di rilevamento dei soli pluviometri: nonostante la rete piemontese sia particolarmente distribuita e fitta in presenza di eventi convettivi intensi è presente una pesante sottostima dell'evento. Infatti, si osserva come le celle convettive riescano ad incunearsi tra le stazioni, e ad assumere valori particolarmente intensi, sfuggendo alla rilevazione degli strumenti a terra. Inoltre, si rimarcano casi in cui, durante la traslazione del fronte temporalesco, i pluviometri vengono solo

sfiorati da quest'ultimo, registrando valori estremamente inferiori ad eventuali scrosci temporaleschi che si presentano a qualche km di distanza.

Infine, la presenza dei dati radar permette la corretta interpretazione di valori inferiori registrati in corrispondenza di strumenti posizionati nelle macro-zone colpite: si sono osservate stazioni circondate dalla perturbazione, senza esserne interessate in quell'intervallo di tempo, giustificando quindi una non correlazione con eventuali malfunzionamenti.

Per quanto riguarda la coerenza tra valori osservati da pluviometro e quelli ottenuti dal metodo si è notata, in generale, una stima delle altezze di pioggia sufficientemente buona, con errori contenuti. In determinati casi si presenta una sottostima nei valori da radar, dovuti probabilmente alla morfologia territoriale in esame e all'elevata intensità del fenomeno.

In conclusione, le mappe prodotte testimoniano la funzionalità della “Tecnica adattiva nello spazio e nel tempo (ATS)” di Libertino et al. (2015) anche in presenza di eventi convettivi intensi, come quello considerato in questa trattazione. Grazie alla possibilità di poter lavorare in intervalli di tempo prossimi a quelli di acquisizione dei dati è possibile seguire in maniera accurata lo svolgimento dell'evento, caratterizzato da una formazione repentina e da elevati valori di riflettività. Si riconferma, da questa trattazione, il ruolo cruciale del radar meteorologico nella identificazione ed il tracciamento di fenomeni distribuiti nello spazio, non facilmente intercettabili da rilevazioni puntuali.

ALLEGATO I: Il radar meteorologico

Il radar meteorologico (*Radio Detection and Ranging*) è uno strumento adibito alla rilevazione di idrometeore (pioggia, neve, grandine) adoperato per la previsione a breve termine e per il monitoraggio degli eventi atmosferici.

Grazie al suo elevato livello di sviluppo tecnologico, il radar presenta la capacità di fornire in tempo reale dati del volume tridimensionale intercettato, permettendo di ottenere una elevata copertura spaziale con una risoluzione di 1 km^2 (nel caso italiano).

L'applicazione dei sistemi radar risale agli inizi del ventesimo secolo e, durante i due grandi conflitti mondiali, ha subito un'accelerazione nello sviluppo tecnologico per scopi bellici, come il rilevamento della posizione, dei mezzi e degli spostamenti del nemico.

Con la fine della Seconda Guerra mondiale lo strumento è stato soggetto ad una rivalutazione da parte della comunità scientifica, indirizzando lo sviluppo tecnologico verso ambiti civili come, ad esempio, quello metereologico.

La creazione dei radar di *prima generazione* ha caratterizzato un notevole passaggio tecnologico, permettendo un'osservazione limitatamente qualitativa dei fenomeni.

Per poter raggiungere una rilevazione anche di tipo quantitativo, è stato adoperato un utilizzo combinato della tecnologia Doppler e di un numero maggiore di bande di frequenza (banda S, C, X) che hanno contribuito alla realizzazione dei radar di *seconda generazione*, incrementando notevolmente le prestazioni dello strumento, tra cui la misurazione della precipitazione, la possibilità di osservare l'eventuale formazione di grandine e lo sviluppo dei fenomeni nel tempo.

Attualmente sono in via di sviluppo i radar di *terza generazione*, che hanno come scopo quello di migliorare ulteriormente le funzioni: associando i vantaggi dei radar Doppler con quelli polarimetrici, si ottengono parametri sempre più utili alla comunità scientifica come quelli cinetici e geometrici delle particelle di precipitazione.

Funzionamento e specifiche

I radar più utilizzati, grazie ad un grado di precisione più elevato, sono i sistemi a doppia polarizzazione che permettono una valutazione della riflettività su due piani ortogonali: la produzione di impulsi polarizzati sia orizzontalmente sia verticalmente consente una più precisa individuazione dei fenomeni meteorologici, grazie ad un'accurata identificazione della precipitazione e della forma delle sue particelle.

I radar utilizzati attualmente sono di tipo Doppler e sono costituiti dalle seguenti componenti:

- un trasmettitore che genera brevi impulsi ad elevata potenza, dell'ordine di 100 kW, ad una frequenza prestabilita, riuscendo ad inviarli fino ad una distanza di 100-250 km di raggio e 10 km di altezza;
- un'antenna che invia l'impulso in atmosfera e riceve il segnale retro-diffuso dalle idrometeore;
- un ricevitore che recepisce, amplifica e converte l'energia ricevuta dal segnale di ritorno. È uno strumento estremamente sensibile, a causa delle potenze dell'ordine di $10^{-13}W$;

La procedura di funzionamento, raffigurata in figura A1, è caratterizzata dall'invio di brevi impulsi di onde elettromagnetiche che vengono emesse in atmosfera lungo la direzione di puntamento dell'antenna, definita tramite tre quantità: l'angolo creato dal fascio radar con il nord geografico (azimut), l'angolo creato con il piano orizzontale (angolo di elevazione) e la distanza tra l'idrometeora ed il radar. La rotazione dell'antenna, con la variazione di questi angoli, permette la captazione di un vasto volume di atmosfera, pari a circa $100km^3$, dove vengono intercettate le idrometeore che assorbono l'energia delle onde elettromagnetiche e la irradiano in tutte le direzioni, compresa quella del radar.

Il segnale di ritorno, analizzato dal ricevitore del radar, permette di elaborare diverse quantità, quali la riflettività, la direzione e la distanza delle idrometeore, la loro velocità radiale e la direzione di spostamento dell'evento complessivo.

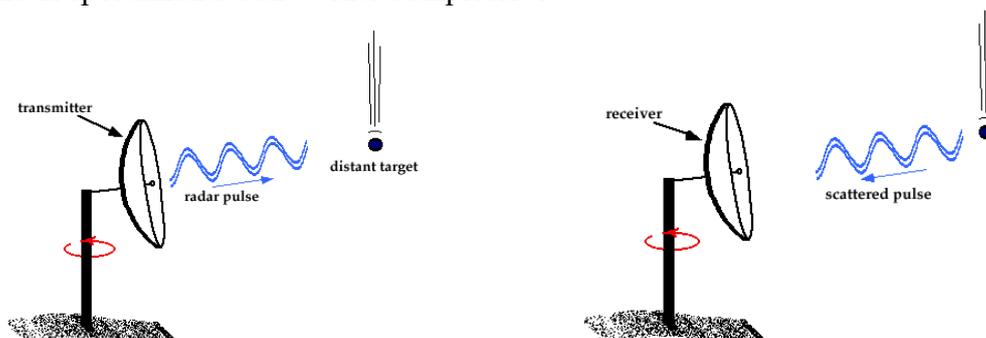


Figura A1 1 Invio e retro-diffusione del segnale radar (Fonte: University of Oklahoma)

I segnali generati dai radar vivono nell'intervallo di frequenze delle microonde, capaci di rilevare oggetti piccoli come le idrometeore: le più utilizzate sono le bande S e C, aventi rispettivamente frequenze comprese tra 2-4 GHz e 4-8 GHz.

Dato che le dimensioni dell'antenna sono proporzionali alla lunghezza d'onda, attualmente i più adoperati nei paesi occidentali sono i radar a banda C, grazie alla loro capacità di ovviare alle problematiche strutturali di instabilità e di possedere ottime prestazioni in campo meteorologico.

Misure ottenute dal radar

Le principali misure ottenute dal radar sono:

- *Riflettività Normale* Z_{dr}

Esprime la quantità di acqua contenuta nella cella radar, offrendo informazioni sull'intensità dell'evento;

Durante la fase di retro-diffusione del segnale, il radar analizza la sua potenza che viene legata, tramite l'equazione fondamentale della radar meteorologia, alla riflettività:

$$Pr = \frac{C \cdot k^2 \cdot \sum D^6}{r^2}$$

dove:

- C è la costante radar
- k è la costante dielettrica
- D è il diametro delle gocce

Ponendo

$$Z = \sum D^6$$

si ottiene

$$Pr = \frac{C \cdot K \cdot Z}{r^2}$$

dove:

- Z è la riflettività
- C e K sono le costanti radar
- r è la distanza dell'idrometeora dal radar
- Pr è la potenza media ricevuta dal bersaglio

L'informazione del segnale viene spesso definita in termini di riflettività Z che, visti gli scopi della meteorologia, viene rapportata all'intensità di precipitazione R .

- *Riflettività differenziale Z_{dr}*

È un fattore di forma dei corpuscoli contenuti nella cella radar, ottenuto tramite la generazione di impulsi trasmessi sia in direzione orizzontale sia in direzione verticale, facendo in modo che l'eco di ritorno del segnale sia dipendente dalla geometria dell'idrometeora posta in direzione del piano di polarizzazione.

La relazione che definisce tale parametro è la seguente:

$$Z_{dr} = 10 \log_{10} \left(\frac{Z_h}{Z_v} \right)$$

dove:

- Z_h è la riflettività dell'onda polarizzata orizzontalmente;
- Z_v è la riflettività dell'onda polarizzata verticalmente;

- *Velocità radiale V dell'elemento contenuto in una cella radar*

È il valore medio della distribuzione dei valori di velocità delle idrometeore captate nel volume intercettato dal radar. È ottenuta grazie all'applicazione dei radar Doppler che, misurando la differenza di fase tra due impulsi e conoscendo la lunghezza d'onda ed il tempo trascorso, calcola la velocità di spostamento del bersaglio in rapporto alla posizione del radar.

Prodotti

Durante il funzionamento del radar, l'antenna effettua una rotazione sia nel piano orizzontale, variando l'angolo di azimut, sia nel piano verticale, modificando l'angolo di elevazione, generando una scansione volumetrica della porzione di atmosfera intercettata. I prodotti più utilizzati del radar sono mappe ottenute, tramite particolari algoritmi, dalla valutazione dei volumi captati, create e trasmesse dal Dipartimento di Protezione Civile, qui di seguito descritti.

- *PPI (PLAN POSITION INDICATOR)*

È una immagine che permette di distinguere tra precipitazione stratiforme e convettiva, prodotta tenendo costante l'angolo di elevazione e variando l'angolo di azimut di un angolo giro. I dati ottenuti, dunque, riguardano la superficie conica con vertice il radar (figura A1 2).

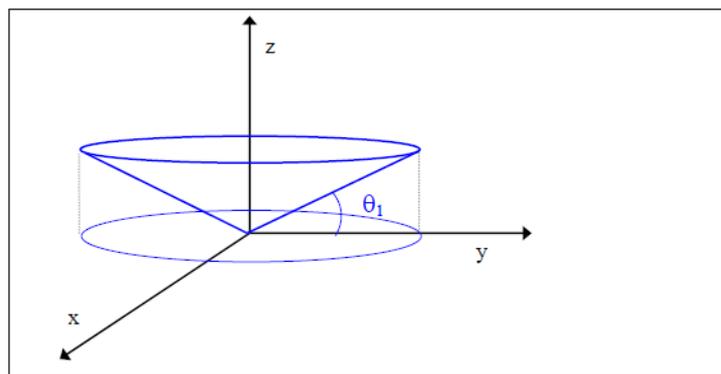


Figura A1 2 PPI (Plan Position Indicator) (Fonte: Principi di funzionamento- misure e prodotti)

- *RHI (RANGE HEIGHT INDICATOR)*

Immagine atta ad esaminare l'evoluzione dei sistemi atmosferici con la quota, ricavata mantenendo costante l'angolo di azimut e modificando l'angolo di elevazione tra due valori prefissati, ottenendo una sezione del volume di atmosfera in corrispondenza del radar (figura A1 3).

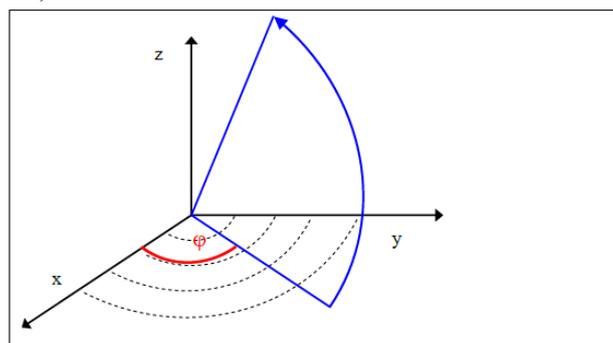


Figura A1 3 RHI (Range Height Indicator) (Fonte: Principi di funzionamento- misure e prodotti)

- *CAPPI (COSTANT ALTITUDE PLAN POSITION INDICATOR)*

È un'immagine ottenibile dopo l'acquisizione in quanto è generata dalla sezione orizzontale del volume captato dallo strumento ad una predefinita altitudine. Attualmente è adoperata per il monitoraggio delle condizioni meteo alle diverse quote in atmosfera (figura A1 4).

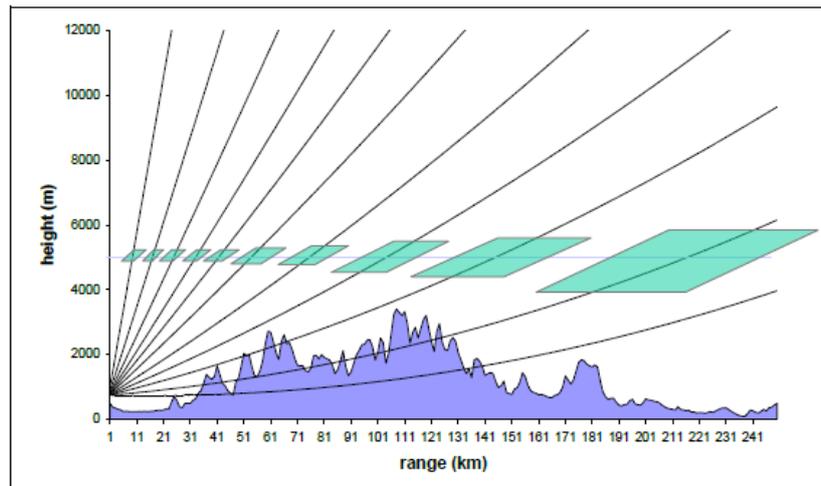


Figura A1 4 CAPPI (Costant Altitude Plan Position Indicator) (Fonte: Principi di funzionamento- misure e prodotti)

- *SRI (SURFACE RAINFALL INTENSITY)*

È un'immagine che presenta una stima dell'intensità di precipitazione al suolo. È possibile ottenere una mappa, chiamata SRT (Surface Rainfall Total) contenente le informazioni sulla precipitazione cumulata in un periodo di riferimento.

Fattori e incertezze nella stima da radar

Le misurazioni effettuate con l'utilizzo del radar, data la complessità dell'elaborazione dei dati volumetrici captati, presentano delle problematiche che, per poter avere una stima il più aderente possibile alla realtà, devono essere corrette.

Le principali cause di errore sono:

- *Attenuazione del segnale*

La presenza in atmosfera di gas come l'azoto, l'ossigeno ed il vapore acqueo influenza il tragitto dell'onda elettromagnetica, riducendo il segnale. L'attenuazione si verifica maggiormente in presenza di corpi nuvolosi e di precipitazioni.

- *Precipitazioni presenti al di sotto del fascio radar*

La modalità di scansione può causare una sottostima della precipitazione: la scelta dell'angolo di elevazione potrebbe non intercettare le precipitazioni poste ad una quota inferiore.

- *Evaporazione al di sotto del fascio radar*

La presenza di masse d'aria secca, poste sotto la direzione di propagazione del fascio radar, durante la precipitazione ne causa un'evaporazione, riducendo l'intensità delle precipitazioni al suolo.

- *Presenza della "bright band"*

È un errore che si verifica nel caso in cui il fascio intercetta lo strato di fusione, ovvero la parte di atmosfera in cui si verifica la trasformazione della neve in precipitazione, comportando una sovrastima della riflettività.

- *Pioggia con gocce fini*

In caso di pioggia debole, o *drizzle*, il radar non capta correttamente le particelle, a causa delle loro dimensioni particolarmente sottili.

- *Propagazione anomala (ANAPROP)*

In questa situazione il fascio radar non effettua una propagazione rettilinea, ma subisce una deviazione in direzione del terreno, non intercettando il volume atmosferico. La causa di tale deviazione è da imputare al fenomeno dell'inversione termica: l'aumento della temperatura dell'aria con la quota viene interrotto ad una certa altezza, comportando una correlata variazione di umidità e dunque di indice di rifrazione.

- *Echi di terra (clutter)*

Sono segnali di ritorno generati dall'intercettazione da parte del fascio radar di ostacoli fissi, naturali o artificiali che impediscono la rilevazione dei bersagli meteorologici. Questo tipo di errore risulta importante in caso di osservazione del campo di precipitazione in regioni ad orografia complessa.

- *Beam blocking od occlusione parziale del fascio radar*

È un errore correlato agli echi di terra: il fascio radar durante la propagazione intercetta un ostacolo prodotto dall'orografia del terreno, impedendo l'intercettazione del volume atmosferico e causando una diminuzione dell'energia propagata, generando una sottostima della riflettività.

I.1 Il contesto piemontese

L'informazione radar in Piemonte viene fornita da Arpa Piemonte che gestisce il radar Bric della Croce (TO), in figura AI 5, e, in collaborazione con Regione Liguria, il radar di Monte Settepani (SV), in figura AI 6.

Gli strumenti effettuano ad intervalli regolari di 5 minuti scansioni volumetriche con elevazioni comprese tra 0 e 30 gradi, che vengono inviate per le successive elaborazioni al Centro Funzionale. Le caratteristiche tecniche di entrambi i radar sono riportate in tabella 4 e 5.



Figura AI 5 Radar Bric della Croce (Fonte: Arpa Piemonte)

Tabella 4 Caratteristiche radar di Bric della Croce (Fonte: Arpa Piemonte)

Località	Pecetto Torinese (TO)
Altezza	736 m
Latitudine	45.03
Longitudine	7.73
Tipo di polarizzazione	Lineare H e V
Diametro antenna	4.2 m
Ampiezza fascio	1.0 deg max.
Massimo livello lobi secondari	-28 dB
Guadagno antenna	44.5 dB
Trasmettitore	Magnetron
Frequenza	5450÷5825 MHz
Potenza di picco	≥250 kW
Durata dell'impulso	0.5,2.0 μs
PRF (Pulse Repetition Frequency)	250÷1200 MHz



Figura A1 6 Radar di Monte Settepani (Fonte: Arpa Piemonte)

Tabella 5 Caratteristiche radar di Monte Settepani (Fonte: Arpa Piemonte)

Località	Calizzano (SV)
Altezza	1390 m
Latitudine	44.25
Longitudine	8.20
Tipo di polarizzazione	Lineare H e V
Diametro antenna	4.2 m
Ampiezza fascio	1.0 deg max.
Massimo livello lobi secondari	-28 dB
Guadagno antenna	44.5 dB
Trasmettitore	Klystron
Frequenza	5600÷5650 MHz
Potenza di picco	≥250 kW
Durata dell'impulso	0.5,1.5,3.0 μs
PRF (Pulse Repetition Frequency)	300÷1200 MHz

ALLEGATO II: Mappe coefficienti

Nelle seguenti pagine vengono riportate le mappe inerenti alla rappresentazione dei coefficienti a, b discusse nel capitolo 4.4.1. del lavoro di tesi.

MAPPA COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 15:00

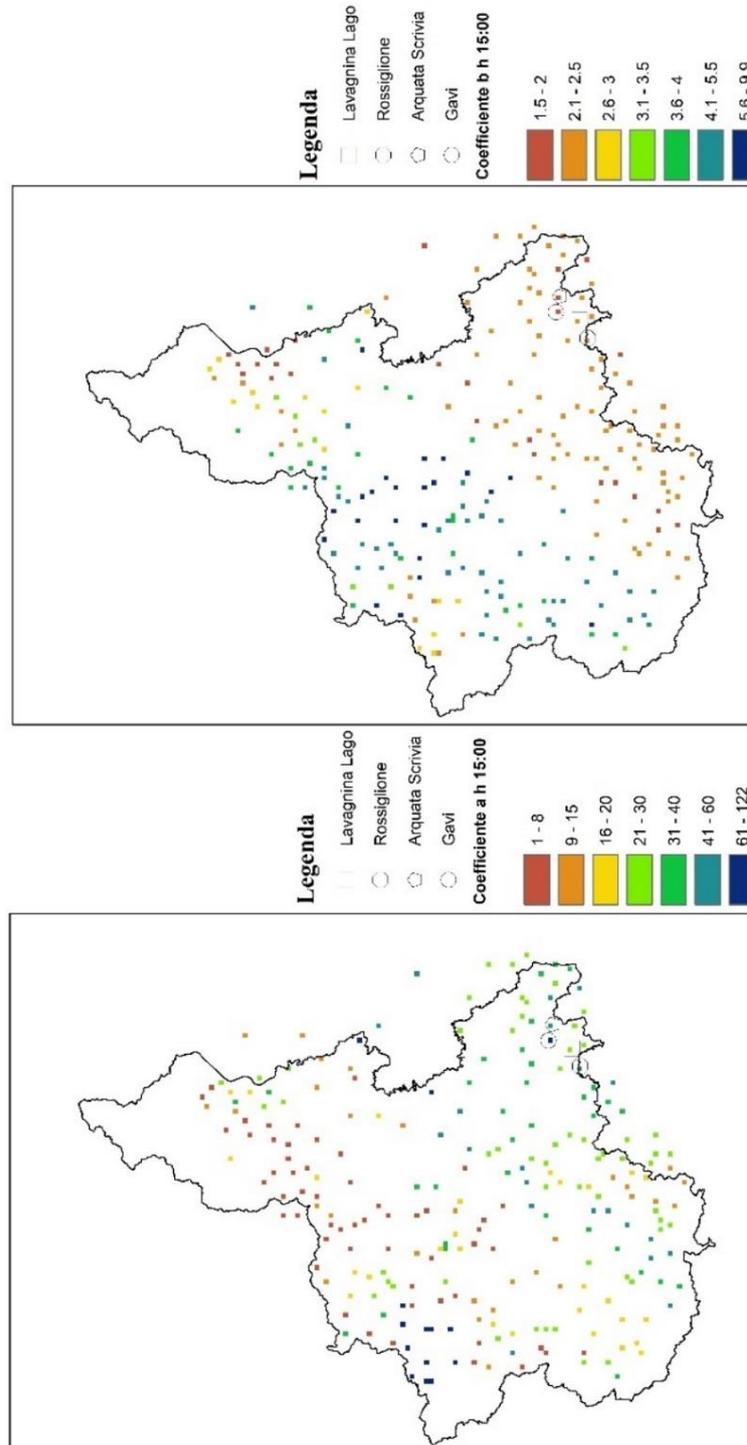


Figura AII 1 Mappe coefficienti a, b – Ore 15:00

MAPPA COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 16:00

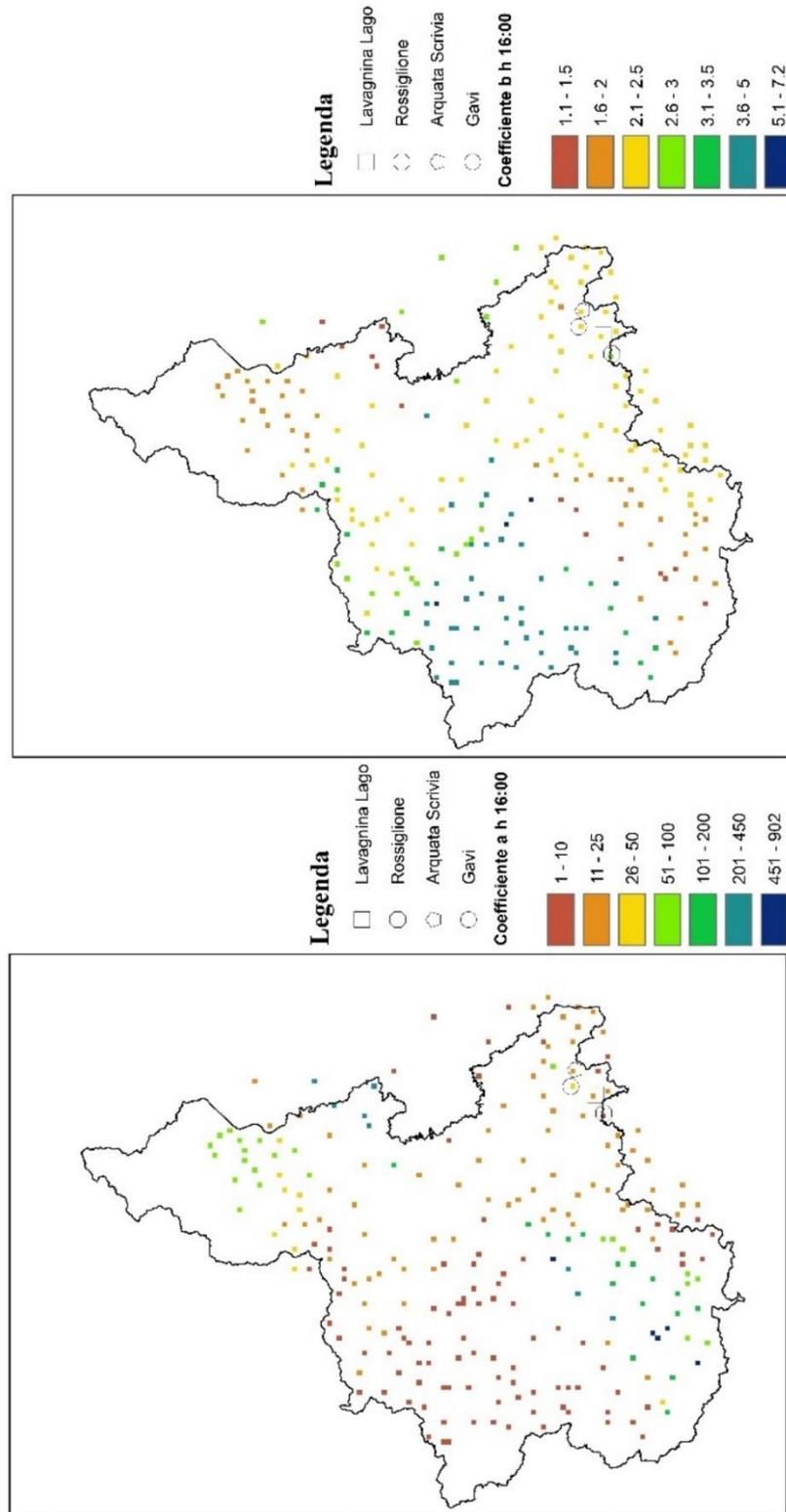


Figura AII 2 Mappe coefficienti a, b – Ore 16:00

MAPPA COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 17:00

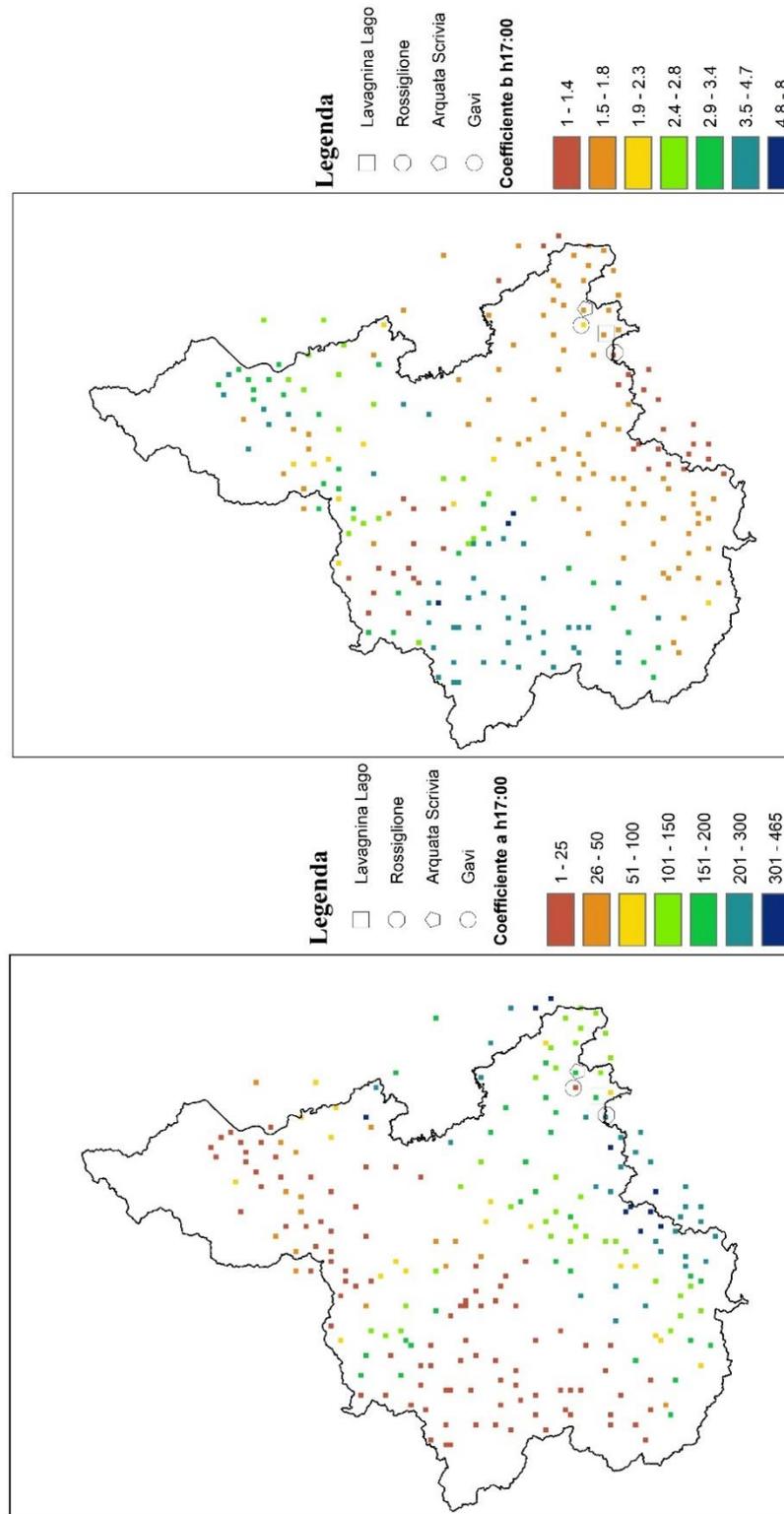


Figura AII 3 Mappe coefficienti a, b – Ore 17:00

MAPPA COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 18:00

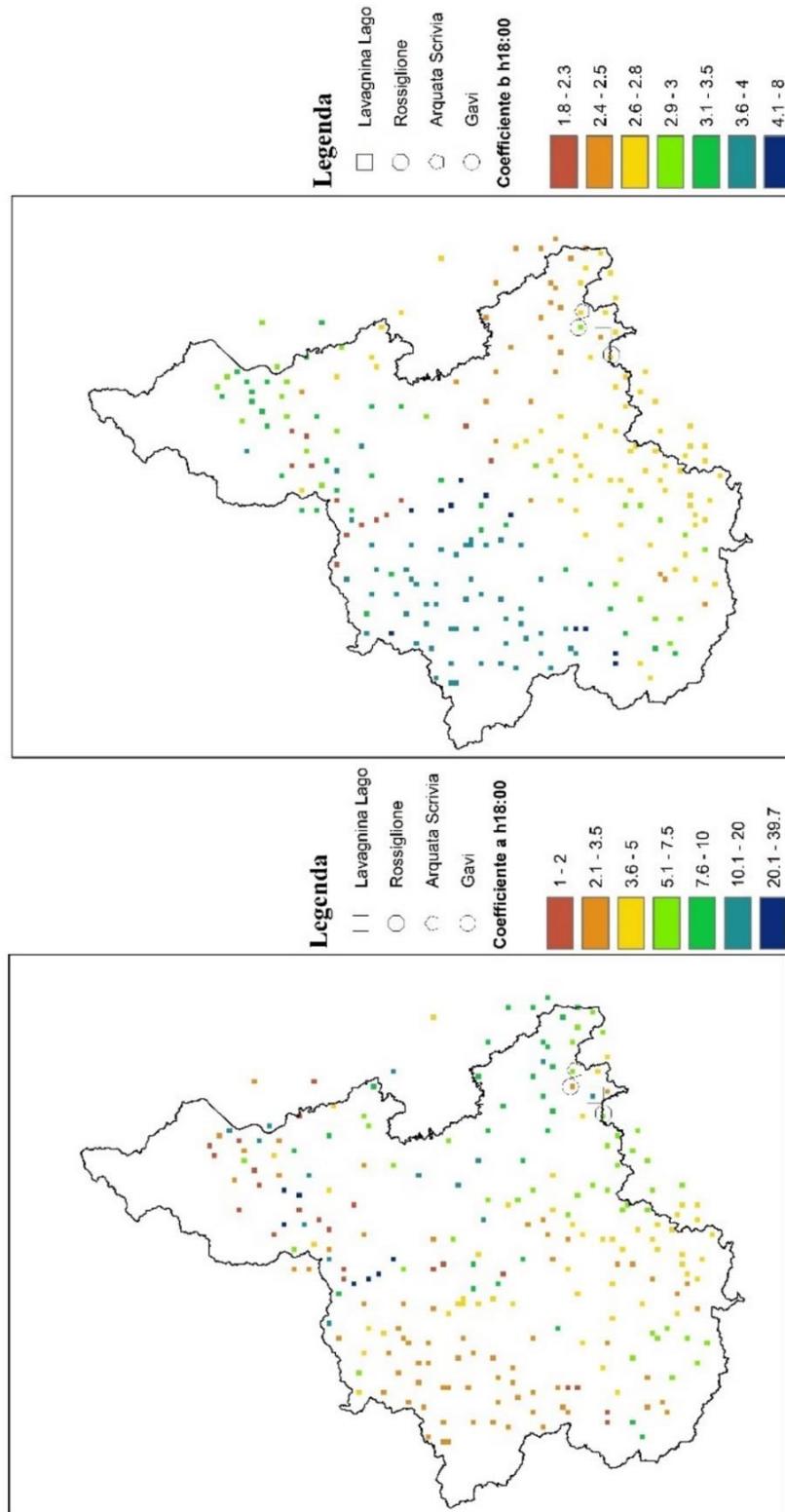


Figura AII 4 Mappe coefficienti a, b – Ore 18:00

MAPPA COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 19:00

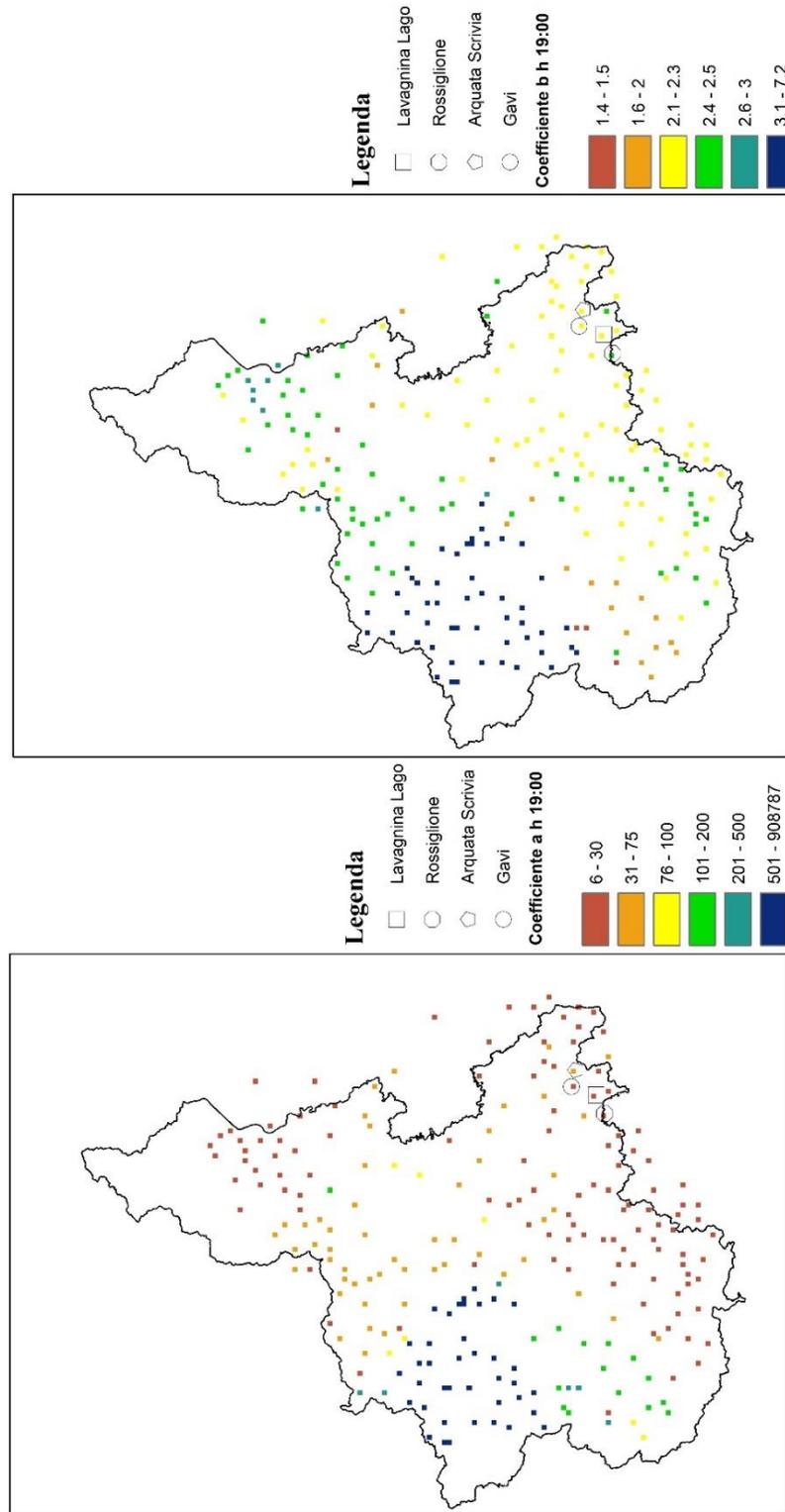


Figura AII 5 Mappe coefficienti a, b – Ore 19:00

MAPPA COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 20:00

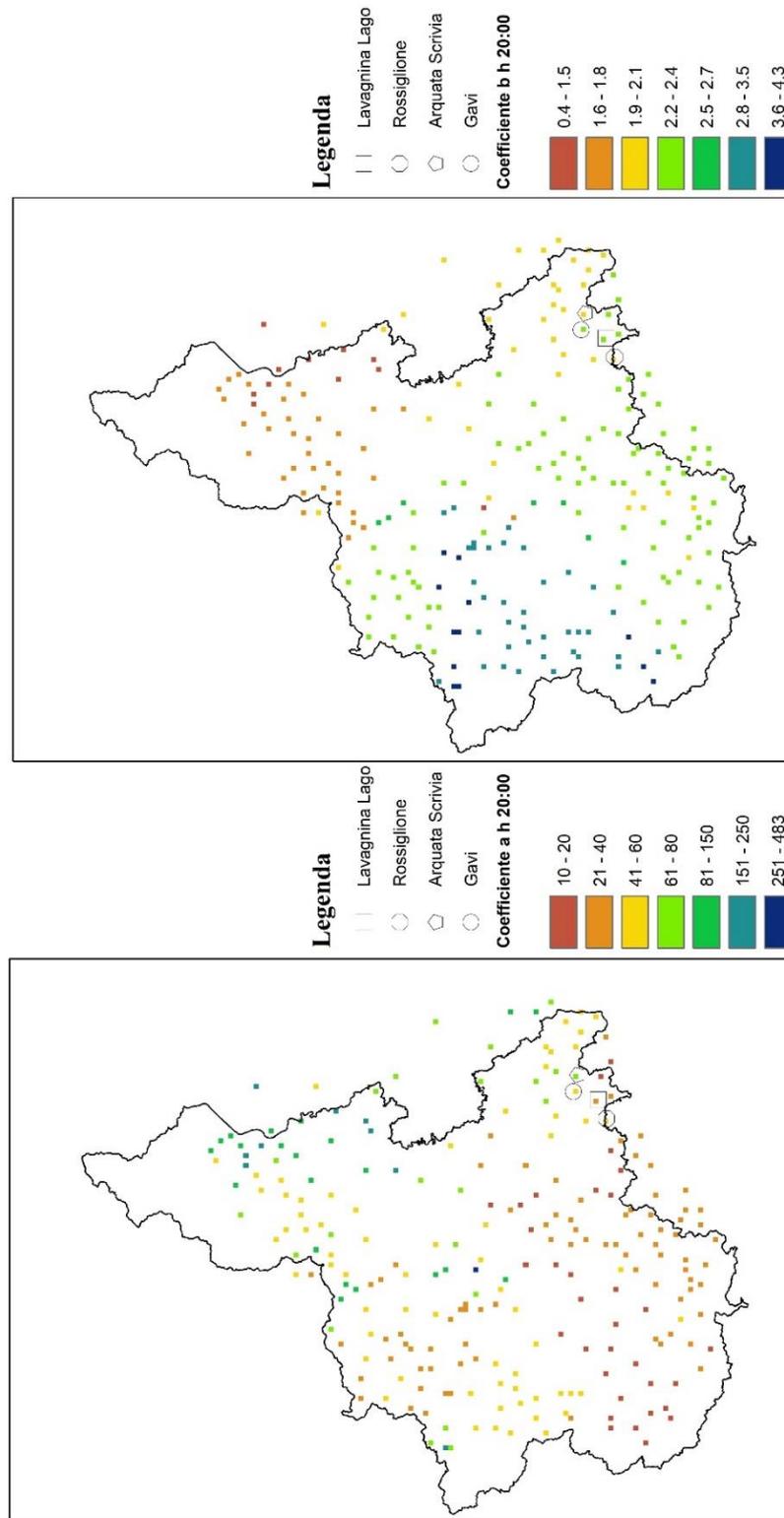


Figura AII 6 Mappe coefficienti a, b – Ore 20:00

ALLEGATO III: Interpolazione dei coefficienti

Nelle seguenti pagine vengono riportate le mappe inerenti alla rappresentazione spaziale dei coefficienti a , b , ottenute mediante la modalità di interpolazione IDW, discusse nel capitolo 4.4.2. del lavoro di tesi.

INTERPOLAZIONE COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 15:00

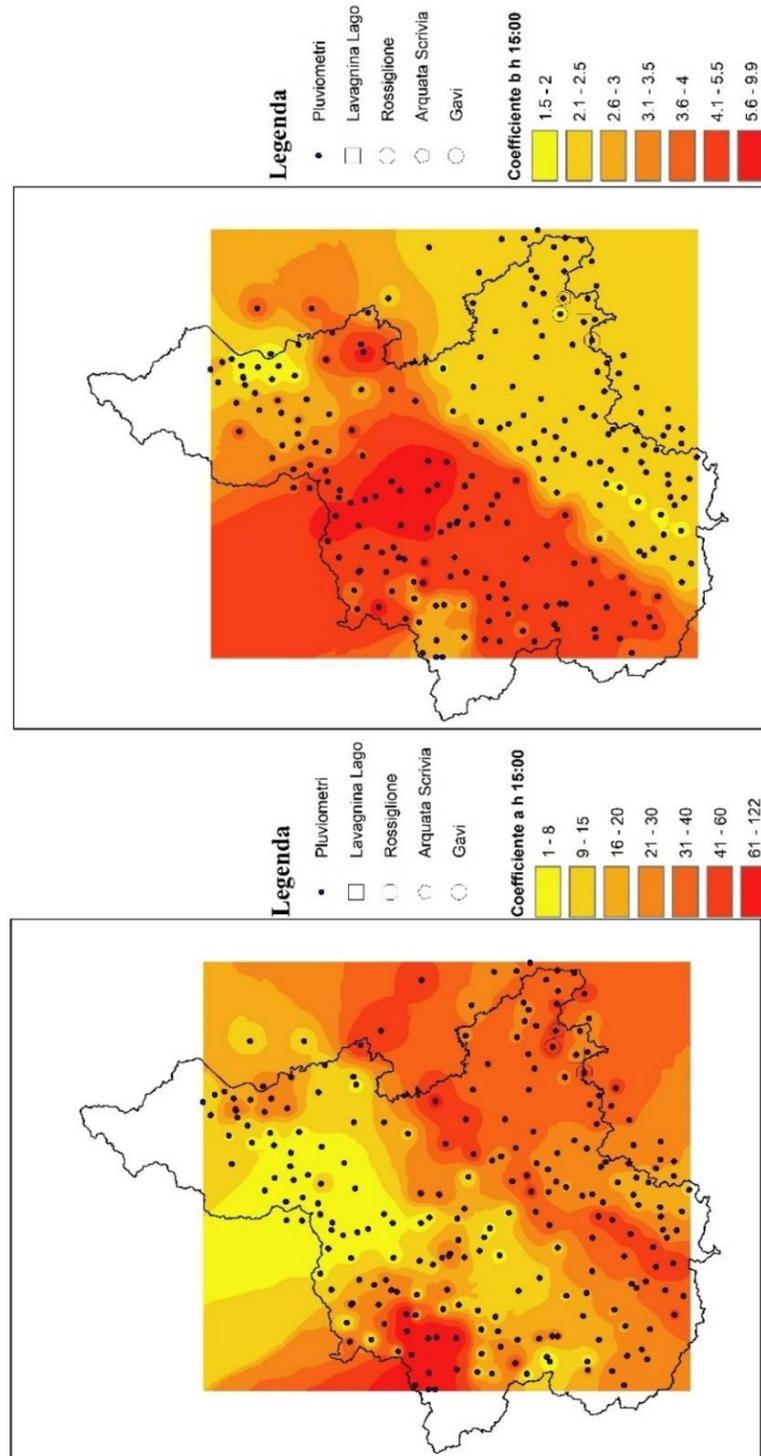


Figura AIII 1 Interpolazione spaziale coefficienti a , b - Ore 15:00

INTERPOLAZIONE COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 16:00

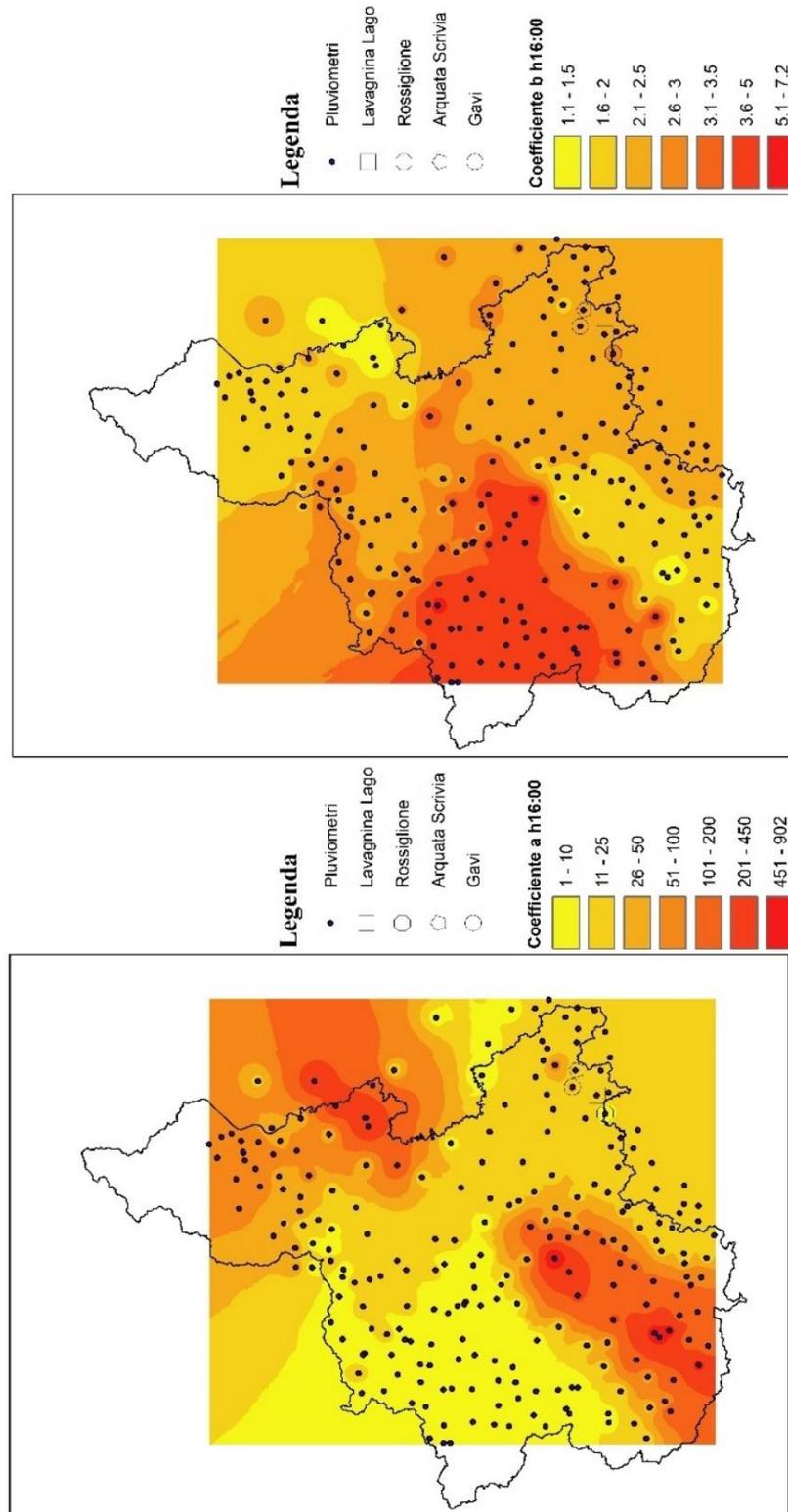


Figura AIII 2 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 16:00

INTERPOLAZIONE COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 17:00

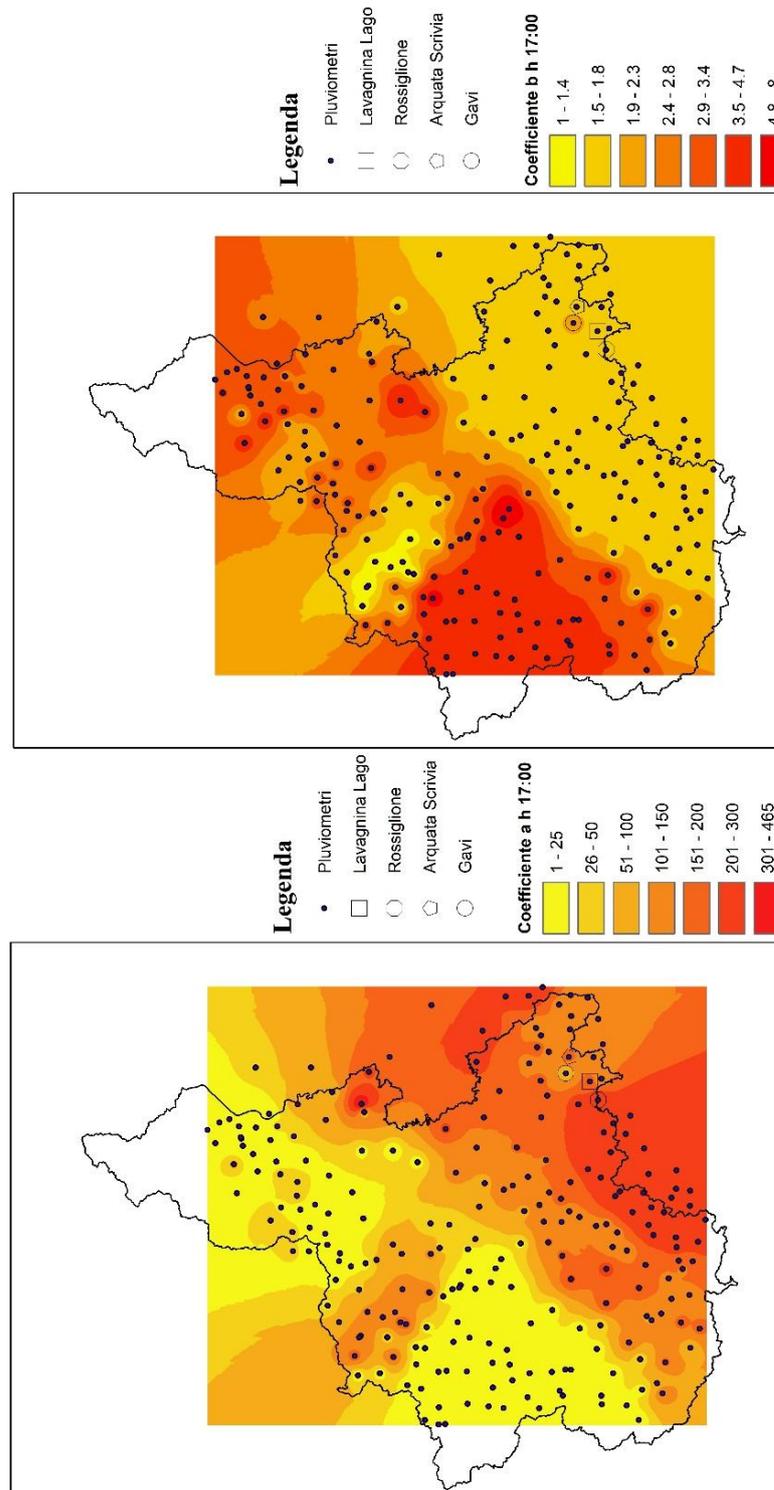


Figura AIII 3 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 17:00

INTERPOLAZIONE COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 18:00

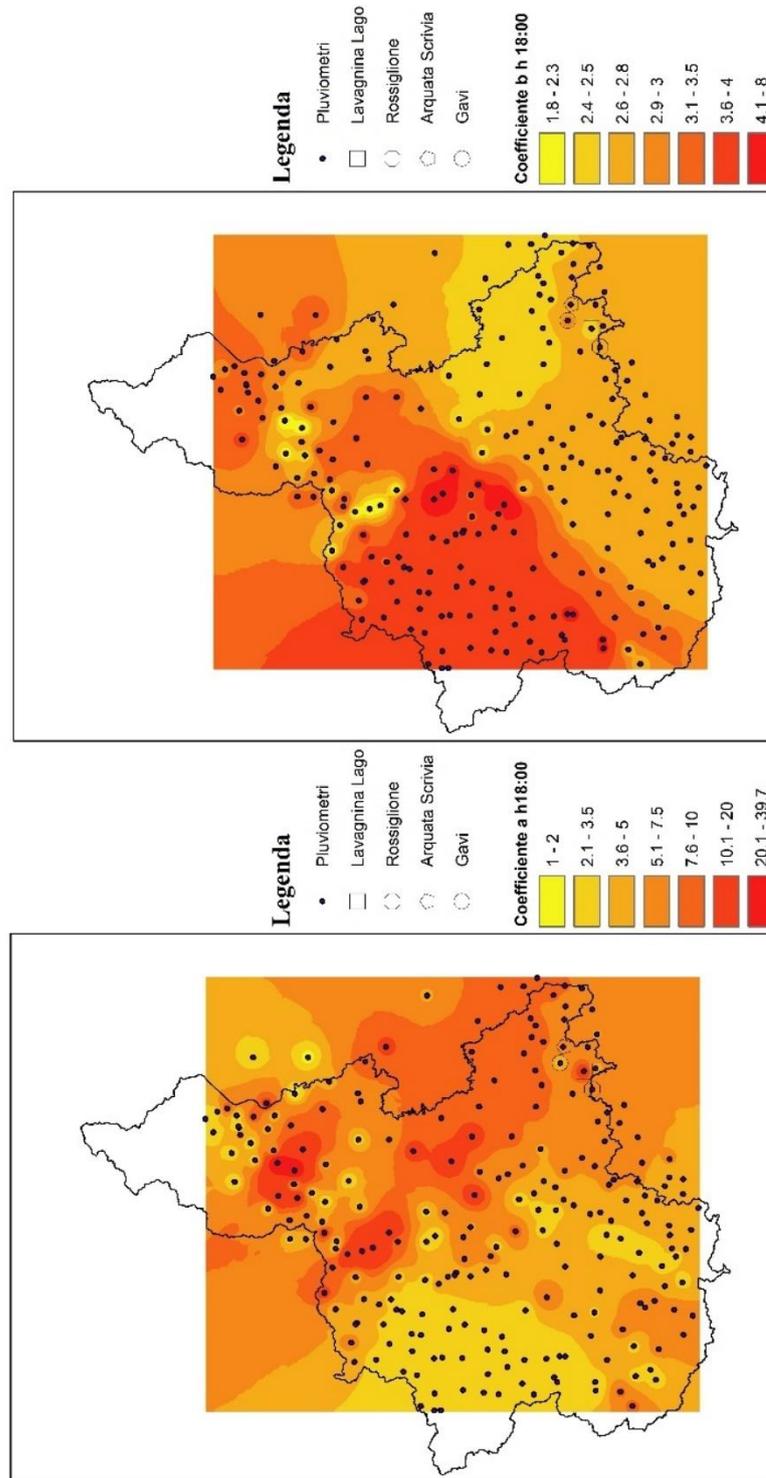


Figura AIII 4 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 18:00

INTERPOLAZIONE COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 19:00

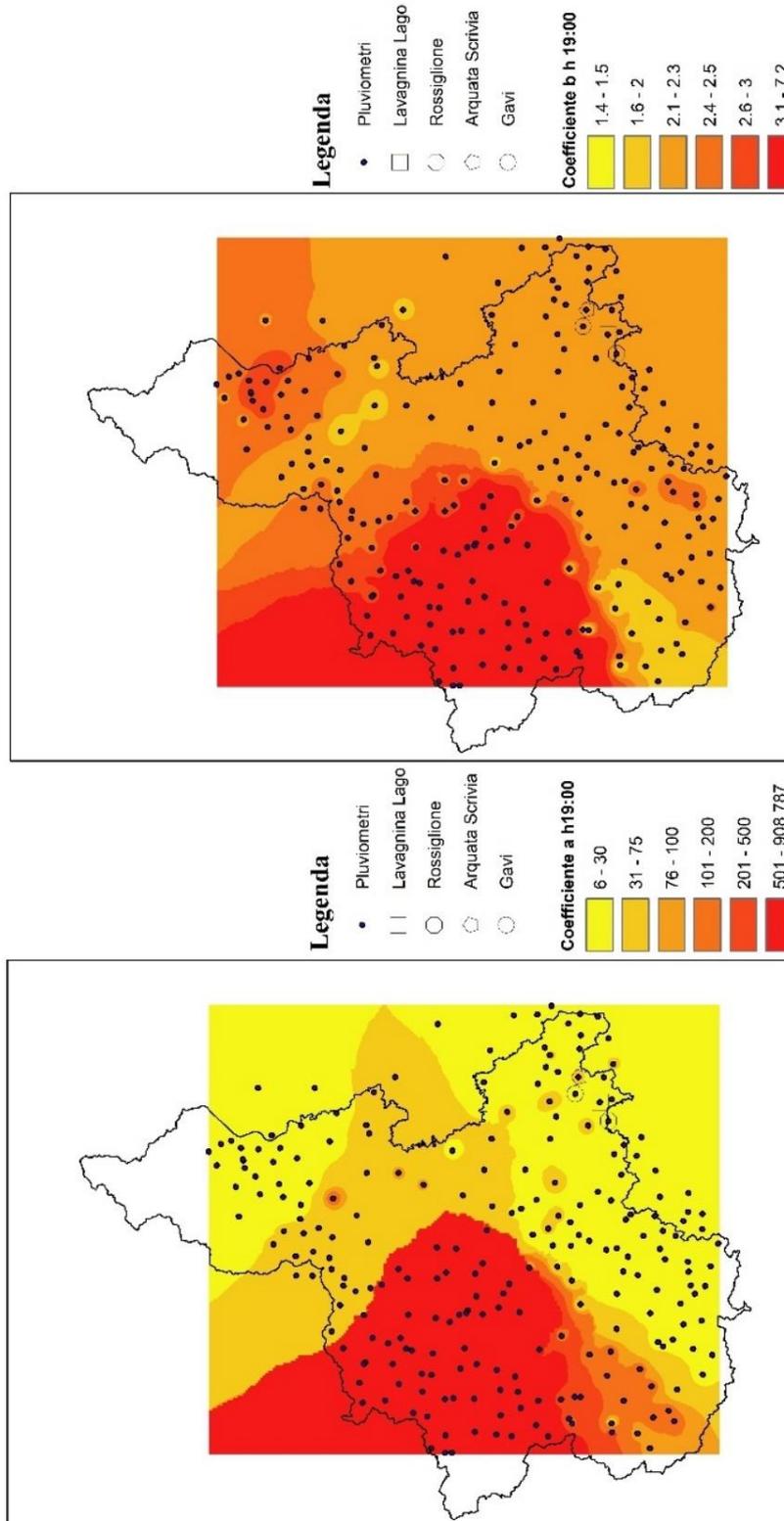


Figura AIII 5 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 19:00

INTERPOLAZIONE COEFFICIENTI

Giorno 21/10/2019 ore 20:00

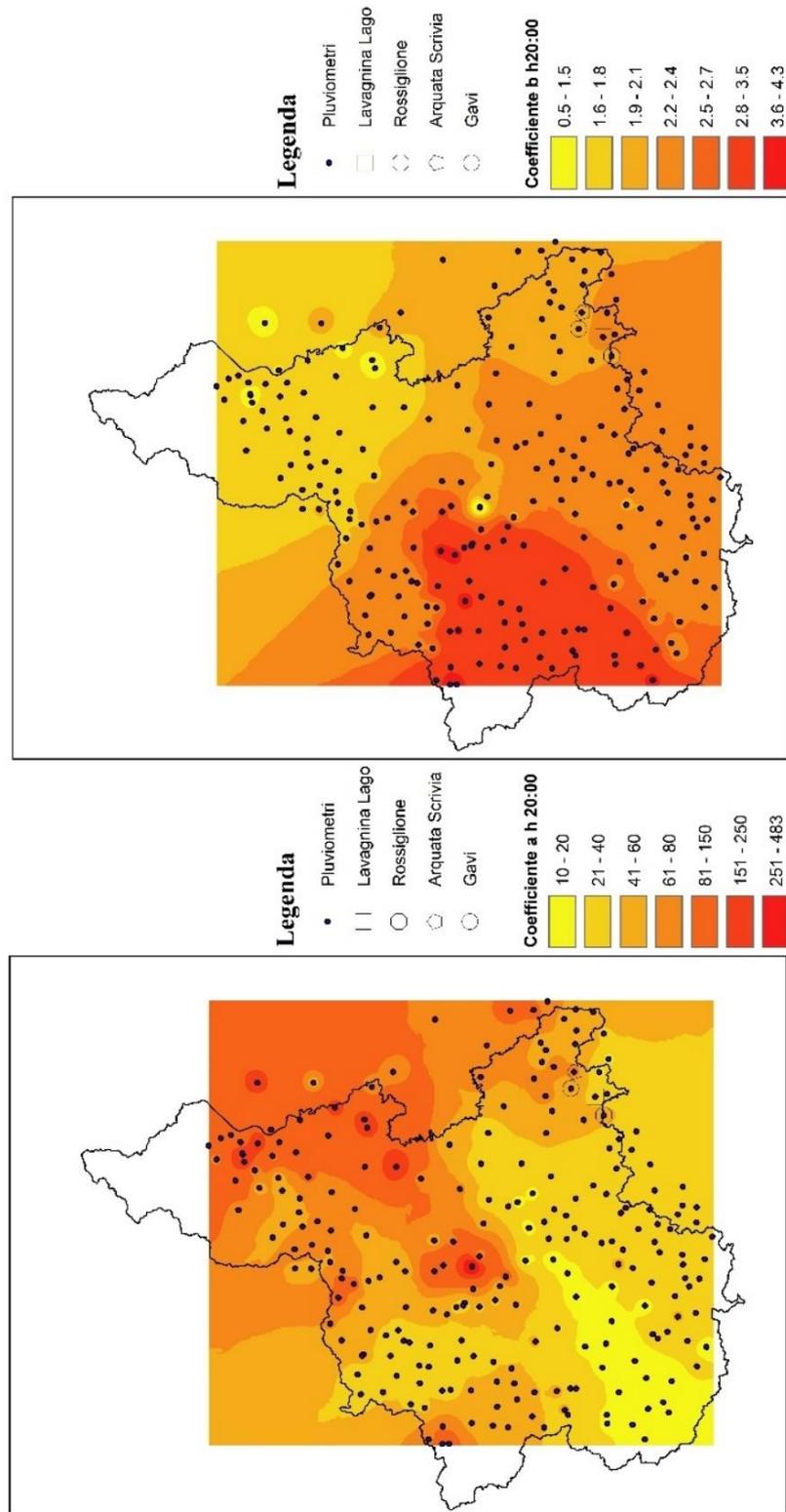


Figura AIII 6 Interpolazione spaziale coefficienti a, b - Ore 20:00

Bibliografia

Alfieri, L., Claps, P., & Laio, F. (2010). Time-dependent Z-R relationships for estimating rainfall fields from radar measurements. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(1), 149–158. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-149-2010>

Arpa Piemonte, Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali (2019). Eventi idrometeorologici dal 19 al 24 ottobre 2019 Parte I. Rapporto di evento.

http://www.arpa.piemonte.it/arpa-comunica/file-notizie/2019/rapporto_evento_preliminare_20_10_20191.pdf

Arpa Piemonte, Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali (2019). Eventi idrometeorologici dal 19 al 24 ottobre 2019 Parte II. Rapporto di evento.

http://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/relazioni-tecniche/analisi-eventi/eventi2019/rapporto-evento-19-24-ottobre_parteii.pdf

Galvano E. Relatori Claps P., Mazzoglio P. (2020). *Tesi di laurea di secondo livello: Ricostruzione delle forzanti meteo da sensori remoti dell'evento alluvionale del 19-24 ottobre 2019 in Piemonte*. Politecnico di Torino, Torino

Giordano P, Principi di funzionamento- misure e prodotti. *Relazione del Dipartimento della Protezione Civile, Ufficio pianificazione, valutazione e prevenzione rischi*

Libertino, A., Allamano, P., Claps, P., Cremonini, R., & Laio, F. (2015). Radar estimation of intense rainfall rates through adaptive calibration of the Z-R relation. *Atmosphere*.

<https://doi.org/10.3390/atmos6101559>

Mennuni S. Relatori Claps P., Libertino A. (2014) *Tesi di laurea di secondo livello: Integrazione dati radar con misure derivanti da stazioni pluviometriche- tecnica adattiva nello spazio e nel tempo*. Politecnico di Torino, Torino

Sax R.,Cunning J.B. (1977). Raindrop size distributions and Z-R relationships measured on the NOAA DC-6 and the ship researcher within the gate B-scale Array, NOAA Technical Memorandum, pp 4. http://repository.library.noaa.gov/noaa_11021_DS1.pdf

Secondo Barbero, Arpa Piemonte, Dipartimento Sistemi Previsionali. (2012) *La difesa delle alluvioni nel territorio alpino. Report conclusivo del progetto FLORA*, pp 38-62. <https://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/pubblicazioni-anno-2012/report-flora.pdf>

Sitografia

ARPA Piemonte:	http://www.arpa.piemonte.it/
ARPA Liguria:	https://www.arpal.liguria.it/
Dipartimento di Protezione Civile:	http://www.protezionecivile.gov.it/
Regione Piemonte:	https://www.regione.piemonte.it/web/
The University of Oklahoma	http://meteorology.ou.edu/

Ringraziamenti

Grazie al mio relatore, il prof. Pierluigi Claps, per la sua disponibilità continua e per le indicazioni preziose nello svolgimento del lavoro di tesi. Ma soprattutto, per avermi dato l'opportunità di mettermi alla prova su questo argomento nuovo ed avvincente.

Grazie alla mia correlatrice, l'Ing. Paola Mazzoglio, per i suoi consigli ed il suo aiuto.

Grazie alla mia famiglia per essermi stata sempre vicina in questi anni di duro lavoro, con pazienza ed affetto. Un grazie particolare a mia mamma, per trovare la luce anche quando non sembra ci sia.

Grazie agli amici di sempre, per aver condiviso, sopportato, gioito con me in questi anni.

Grazie a Francesca, la mia ancora.

Grazie a tutti i compagni di corso che mi hanno accompagnato in questi anni di studio, per le risate, per i caffè e per aver reso più leggeri i periodi più tosti. In particolar modo grazie a Sonia, Elia, Elena, Annarita, Chiara e Roberta.