

Le precipitazioni intense in Piemonte

Distribuzione regionale delle piogge e caratterizzazione statistica dei valori estremi

PROGETTO E COORDINAMENTO GENERALE:

Secondo Barbero

Arpa Piemonte, Dipartimento Sistemi Previsionali

AUTORI:

ANALISI CLIMATICA DEGLI EVENTI PLUVIOMETRICI ESTREMI

Marzia Ciampittiello, Claudia Dresti, Helmi Saidi - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per lo Studio degli Ecosistemi

RACCORDO TRA SERIE DERIVANTI DA STRUMENTI MECCANICI ED AUTOMATICI

Fiorella Acquaotta, Adriana Albanese, Simona Fratianni, Luciano Masciocco - Università di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra

Manuela Bassi, Barbara Cagnazzi, Roberto Cremonini - Arpa Piemonte, Dipartimento Sistemi Previsionali

ATLANTE DELLE PRECIPITAZIONI INTENSE

Paola Allamano, Elisa Bartolini, Pierluigi Claps, Domenico De Santis, Francesco Laio - Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente del Territorio e delle Infrastrutture

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

FOTOGRAFIE IN COPERTINA

Archivio Arpa Piemonte

IMPAGINAZIONE

Marcopolo srl, Torino

Finito di stampare nel mese di luglio 2013 presso la tipografia
Grafica Reventino Srl, Decollatura (CZ)

respecta 100

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

ISBN 978-88-7479-124-8

©2013, Arpa Piemonte

Via Pio VII, 9 - 10135 Torino - Italia

www.arpa.piemonte.it

PROGETTO COFINANZIATO:



LE OPPORTUNITÀ NON HANNO CONFINI

INDICE

Introduzione	5
1. Analisi climatica degli eventi pluviometrici estremi	7
1.1. Obiettivi.....	7
1.2. Raccolta di dati.....	8
1.2.1 Stazione di Pallanza.....	8
1.2.2 Bra.....	9
1.2.3 Vercelli.....	10
1.2.4 Digitalizzazione.....	11
1.3. Metodologia.....	13
1.3.1. Indici di eventi estremi	14
1.3.2 Test di Mann-Kendall.....	14
1.3.3. Peaks-Over-Threshold (POT).....	15
1.4. Analisi dei risultati.....	16
1.4.1 Massimi annuali.....	16
1.4.2 Massimi stagionali	17
1.4.3 Indicatore di frequenza	17
1.4.4 Indicatore di intensità	18
1.4.5 Peaks over threshold.....	19
1.5 Conclusioni.....	22
2. Raccordo tra serie derivanti da strumenti meccanici ed automatici.....	23
2.1. Obiettivi.....	23
2.2. Confronto tra gli strumenti delle due reti meteorologiche	25
2.3. Metodi di analisi e di confronto dei dati pluviometrici	29
2.4. Conclusioni.....	33
3. Atlante delle precipitazioni intense.....	34
3.1. Obiettivi.....	34
3.2. La raccolta dati	36
3.2.1 Enti preposti al monitoraggio	36
3.2.2 Disponibilità di dati.....	36
3.3. Metodi	38
3.3.1 Determinazione del trend tra quota e precipitazione	39
3.3.2 Determinazione del variogramma	40
3.3.3 Applicazione del kriging ordinario a scala annuale: algoritmo sequenziale.....	41
3.3.4 Applicazione alle durate super-orarie	44
3.3.5 Integrazione della curva di possibilità pluviometrica alle durate sub-orarie.....	44
3.3.6 Risultati e considerazioni.....	46
3.3.7 Curva intensità-durata media: analisi globale	47
3.3.8 Stima del fattore di crescita delle precipitazioni estreme	48
3.4. Conclusioni.....	49

Bibliografia	50
Capitolo 1	50
Capitolo 2	51
Capitolo 3	52

Introduzione

I prolungati periodi siccitosi intercalati da intensi eventi alluvionali che si sono verificati nelle Alpi occidentali negli anni recenti, unite alle previsioni dei modelli climatologici riguardo all'aumento della probabilità di eventi estremi (alluvioni e siccità) nell'area Mediterranea, inducono a studiare attentamente la climatologia delle precipitazioni. La ricerca di trend nelle serie storiche di eventi estremi è pertanto diventata un tema di particolare interesse, sia perché la loro presenza potrebbe rappresentare un segnale del cambiamento climatico in atto, sia perché la conoscenza dell'evoluzione nel tempo può diventare uno strumento di supporto nella definizione di possibili scenari futuri, nella pianificazione e nella gestione delle risorse di un territorio.

Al fine di fornire un contributo nella comprensione di questi fenomeni nel presente studio si è provveduto a ricostruire lunghe serie temporali di precipitazioni brevi ed intense disponibili sul territorio del Piemonte attraverso il recupero e la raccolta dei dati cartacei, la loro digitalizzazione e validazione; su queste serie temporali sono poi state applicate tecniche di analisi statistica per verificare il comportamento nel tempo degli eventi piovosi estremi.

Sulla base dei risultati ottenuti si è poi potuto affrontare il tema dell'aggiornamento dell'atlante delle precipitazioni intense assumendo che le serie delle precipitazioni massime annue fossero sostanzialmente stazionarie.

Il primo atlante regionale per la determinazione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica veniva realizzato nel 1998 nell'ambito di due programmi Interreg di cooperazione interregionale Italia-Francia ed Italia-Svizzera utilizzando le misure di precipitazione rilevate tra il 1928 e il 1985 dalle stazioni meccaniche dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN). Lo sviluppo di reti meteorologiche automatiche avvenuto negli ultimi 20 anni consente oggi di disporre di un'informazione pluviometrica di maggior dettaglio spazio-temporale rispetto al passato. A partire dagli anni 90 infatti sono nate nuove reti di rilevamento regionali costituite da strumenti automatici che via via si sono espanse andando ad integrare o sostituire gli strumenti meccanici generalmente obsoleti del SIMN. Nel 2002, con il trasferimento delle competenze del SIMN alle Regioni, si è definitivamente consolidato il processo di ammodernamento della rete di misura che oggi è costituita da strumenti automatici in grado di fornire misure in tempo reale e con un elevato dettaglio temporale.

Nel presente studio si è quindi valutata la possibilità di unire serie di dati di precipitazione acquisite da due differenti reti pluviometriche attive sul territorio in tempi diversi (strumenti meccanici ed automatici), analizzando le differenze tra queste due fonti di informazione attraverso un confronto in 26 località in cui si disponeva di un periodo di contemporaneo funzionamento.

Poiché per oltre il 50% dei siti analizzati non è risultato possibile unire le serie, si è optato per utilizzare un nuovo metodo operativo di ricostruzione spazio-temporale delle precipitazioni estreme consistente nella ricostruzione mediante kriging dei valori massimi annui per ogni anno di osservazione.

Il metodo, denominato "kriging sequenziale", è stato applicato alle serie di precipitazioni estreme con durate 1-24 ore consentendo di stimarne le serie storiche ed i parametri della relazione intensità-durata-frequenza su un grigliato regolare che copre l'intero Piemonte. La relazione stimata localmente è poi stata estesa al campo delle durate sub-orarie introducendo una relazione compatibile con il comportamento reale delle precipitazioni nel campo delle durate inferiori all'ora. Nel complesso il metodo fornisce, per ciascun punto griglia, tre parametri per la caratterizzazione della curva intensità-durata.

La disponibilità di serie storiche ricostruite in modo omogeneo nel tempo e nello spazio ha permesso di aggiornare l'atlante delle precipitazioni e potrà consentire ulteriori approfondimenti sulla distribuzione dei quantili per diversi periodi di ritorno.

L'atlante regionale con cui determinare le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica riveste una grande importanza in numerosi problemi di ingegneria, quali ad esempio la progettazione di interventi di opere idrauliche e di difesa del territorio oltre che nelle attività di monitoraggio del Centro Funzionale per caratterizzare la magnitudo delle precipitazioni in corso e valutarne i possibili effetti.

1. Analisi climatica degli eventi pluviometrici estremi

1.1. Obiettivi

I cambiamenti climatici e le conseguenti variazioni ambientali interessano oggi non solo la ricerca scientifica, ma suscitano anche vivo interesse in ambito politico ed economico, a causa della crescente incidenza che possono avere sulla qualità della vita. Gli impatti di tali cambiamenti sul territorio e sulle risorse ambientali si presume possano essere di varia natura. Essi possono essere sintetizzati nella riduzione della disponibilità di risorse idriche, nel deterioramento della qualità dei suoli, nell'incremento dei processi erosivi e nell'aumento del rischio di alluvioni.

A questo proposito nel 1988 è stato costituito l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), allo scopo di valutare le informazioni scientifiche, tecniche e socio-economiche relative alla comprensione del cambiamento climatico indotto dall'uomo, dei potenziali impatti dei cambiamenti del clima e le possibili forme di mitigazione degli stessi. Lo scenario climatico previsto dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) per il XXI secolo (IPCC, 2012) è molto preoccupante; maggiore frequenza degli eventi estremi, lunghi periodi siccitosi, diminuzione considerevole delle precipitazioni estive e incremento dell'intensità degli eventi brevi ed intensi, sono le tendenze meteorologiche attese e già riconosciute in diverse aree del globo, tra cui l'Europa (Alpert et al., 2002). Gli eventi caratterizzati da forti precipitazioni che vedranno aumentata la loro frequenza, faranno aumentare il rischio di inondazioni (IPCC, 2007).

La situazione italiana per il futuro è incerta e fortemente variabile e necessita di attenzione. Studi recenti (Brunetti et al., 2002; 2004) hanno dimostrato che negli ultimi 50 anni, le condizioni climatiche si sono evolute secondo i seguenti pattern:

- il numero di giorni piovosi è diminuito di circa il 14%, mentre le precipitazioni totali hanno subito un decremento stimato in 47 mm/100 anni per il nord e in 104 mm/100 anni per il sud;
- a livello stagionale si riscontra che la riduzione dei giorni piovosi è molto più elevata in inverno rispetto alle altre stagioni;
- sempre a livello stagionale, si riscontra una tendenza all'aumento dell'intensità delle precipitazioni e ad una diminuzione della loro durata, soprattutto in inverno;
- è aumentato il numero degli eventi estremi;
- in particolare, sul nord dell'Italia (Brunetti et al., 2000) l'incremento dell'intensità delle precipitazioni provoca un aumento della percentuale di precipitazione giornaliera (PG) se ci si riferisce a classi di precipitazioni molto alte ($25\text{mm} < \text{PG} < 50\text{mm}$ e $\text{PG} > 50\text{mm}$), e ad una diminuzione di quelle di classi inferiori ($0\text{mm} < \text{PG} < 2.5\text{mm}$ e $2.5\text{mm} < \text{PG} < 12.5\text{mm}$).

A scala regionale, per il Piemonte (Bovo e Pelosini, 2007), si può sottolineare una debole tendenza statisticamente significativa all'incremento della lunghezza media e massima dei periodi secchi. Un trend positivo nelle temperature estive ed un'assenza di trend nelle precipitazioni, implicano un aumento di condizioni di aridità nell'area in esame. In Piemonte le tendenze delle analisi statistiche delle precipitazioni sono molto deboli e non significative.

La ricerca di trend nelle serie storiche di eventi estremi è pertanto diventata un tema di particolare interesse ed a tale fine si è provveduto alla raccolta delle serie storiche di precipitazioni brevi ed intense e al recupero di dati cartacei e all'approfondimento delle tecniche e dei metodi di analisi statistica per gli eventi piovosi estremi e per le lunghe serie temporali.

1.2. Raccolta di dati

Le stazioni su cui si è concentrata la digitalizzazione, la verifica e l'analisi di lunghe serie temporali (Tab. 1) sono state scelte tra quelle a disposizione di ARPA Piemonte e tra quelle all'interno del bacino del Lago Maggiore, a disposizione del CNR-ISE (stazione di Pallanza).

Anni digitalizzati	Stazione	Provincia	Coordinate UTM_X	Coordinate UTM_Y	Quota [m s.l.m.]	Bacino di appartenenza
1951-1991	Pallanza	VB	465025	5086015	211	Lago Maggiore
1933-2003	Bra	CN	406484	4950575	290	Po
1927-2003	Vercelli	VC	450608	5020448	135	Sesia
1939-2003	Lombriasco	TO	392207	4965614	241	Po

Tab. 1. Anagrafica delle stazioni digitalizzate

Queste stazioni sono state selezionate tra quelle caratterizzate da un lungo periodo di funzionamento (superiore a 40 anni) e quelle dotate di misurazione pluviografica.

Per ciascuna stazione si sono cercate informazioni circa la tipologia di strumenti utilizzati nel tempo, eventuali cambiamenti nella loro posizione, o del tipo di strumento, visto l'elevato numero di anni da analizzare; questo al fine di interpretare al meglio i dati digitalizzati, valutando se cambiamenti nel trend o nelle caratteristiche pluviometriche dell'area, siano dovute ad un effettivo cambiamento climatico o invece all'effetto dei cambiamenti strumentali avvenuti negli anni.

1.2.1 Stazione di Pallanza

La registrazione dei dati pluviometrici alla stazione di Pallanza (VB) è iniziata nel 1951 ed è proseguita nel tempo con diversi strumenti (Ambrosetti et al., 2006):

- dal 1951 fino al 30 marzo 1956 si è utilizzato un apparecchio tipo Palazzo della ditta Salmoiraghi con sensibilità di pioggia pari a 0,1 mm;
- dal 30 marzo 1956 fino agli inizi degli anni '80 è stato utilizzato un pluviografo SIAP UM 81 con sensibilità di pioggia pari a 0,2 mm, a zone settimanali;
- dagli inizi degli anni '80 il pluviografo SIAP UM 81 è stato sostituito da un modello SIAP a registrazione continua, tuttora in funzione;
- nel marzo 1992 è stata installata una stazione automatica a vaschetta basculante, modello PMB2 CAE, con sensibilità pari a 0,2 mm.

Il pluviografo Salmoiraghi ed i due diversi pluviografi della SIAP, sono sempre rimasti nella stessa posizione, ovvero sulla torretta dell'Istituto Italiano di Idrobiologia "Dott. Marco De Marchi" ora Istituto per lo Studio degli Ecosistemi del Consiglio Nazionale delle Ricerche. La stazione automatica invece, è stata installata nel giardino sottostante la torretta, sempre all'interno della proprietà dell'Istituto per lo Studio degli Ecosistemi.

L'ubicazione della torretta è riassunta qui di seguito: (Barbanti, 1968)

- Latitudine 45° 55' 25" N
- Longitudine 3° 54' 18" W da Monte Mario
- Quota 224 m s.l.m.

La posizione della stazione automatica, non si discosta di molto da quelle poste nel tempo, sulla torretta, se non per la quota:

- Latitudine 45° 55' 25" N
- Longitudine 8° 32' 50" E
- Quota 202 m s.l.m.

Dal 1996 la stazione meteorologica automatica di Pallanza è entrata a far parte della rete meteo idrografica regionale.

Durante il periodo relativo alla digitalizzazione dei dati di pioggia, dal 1951 al 1991, la stazione è sempre rimasta nella stessa posizione e si sono avuti due cambi di strumento, a diversa sensibilità.

1.2.2 Bra

La stazione di Bra (CN) è presente da lungo tempo ed ha al suo attivo un lungo periodo continuo di osservazioni termo-pluviometriche, dal 1862, ed è posta all'Osservatorio Museo Civico Craveri (Cortemiglia, 1999). Nel tempo la stazione termo-pluviometrica ha subito alcuni spostamenti sia in quota che in direzione orizzontale, riassunti nella **tabella 2**. Per quanto riguarda il periodo di interesse dell'analisi statistica condotta, ovvero dal 1933 al 2003 la stazione ha subito un solo spostamento altitudinale.

Il pluviometro della stazione era inizialmente installato sopra il tetto della residenza Craveri a 10,87 metri dal suolo, ed era costituito da un cilindro del diametro di 0,357 cm con fondo collegato con un tubo di piombo alla sottostante stanza, destinata a laboratorio; le osservazioni venivano effettuate alle ore 10:00 (Cortemiglia, 1999).

Periodo	Latitudine N	Longitudine W	Quota [m s.l.m.]	Spostamento orizzontale [m]	Spostamento verticale [m]	Letture [ore]
dal 1/12/1859 al 31/12/1863	44°42'00"	4°35'59,5"	300,87	0	0	dalle 10:00 alle 10:00
dal 1/1/1864 al 30/11/1932	44°42'00"	4°35'59,5"	303	0	+2,13	dalle 21:00 alle 21:00
dal 1/12/1932 al 31/12/1971	44°42'00"	3°59'32"	303	0	0	dalle 19:00 alle 19:00
dal 1/1/1972 al 10/3/1972	44°42'00"	3°59'32"	303	0	0	dalle 9:00 alle 9:00
dal 11/3/1972 al 2003	44°41'59,1"	3°59'28"	291,5	42 → SW	-11,5	dalle 9:00 alle 9:00

Tab. 2. Posizioni dell'Osservatorio Museo Civico Craveri dal 1859 ad oggi per quanto riguarda i rilievi pluviometrici (Cortemiglia, 1999).

Dal 1/12/1932 al 31/12/1971 la stazione meteorologica si trovava nella cosiddetta specola, ovvero un terrazzo sul tetto, realizzato in posizione soprastante alla precedente in cui si trovavano un termometro per la misura delle minime, un termometro per la misura delle massime, uno psicrometro, un barometro, un pluviometro ed un anemometro. La strumentazione posta in questa torretta presentava un'altezza sul suolo di 13 metri e le letture venivano eseguite alle ore 19:00. (Cortemiglia, 1999).

Dall'11 marzo del 1972 la strumentazione di rilevamento dei dati venne trasferita in una capanna meteorologica, sistemata nel sottostante giardino, con gli strumenti posti ad un'altezza di 1,5 m al

suolo, mantenendo la stessa metodologia di acquisizione delle temperature adottata dal 1 gennaio del 1961, mentre, per la quantità di pioggia giornaliera, l'orario di inizio registrazione fu portato alle ore 9:00 (Cortemiglia, 1999). In questa posizione è rimasta fino al 2003. Nel 1993 ARPA Piemonte ha installato una stazione meteorologica automatica nel giardino dell'Osservatorio, in prossimità della stazione meccanica; alla sua dismissione la stazione automatica, di fatto ha sostituito la vecchia strumentazione, continuando ad oggi la raccolta dei dati meteorologici. Per quanto riguarda il periodo di digitalizzazione dei dati (1933-2003), la stazione ha subito un solo spostamento, sia in quota che in direzione orizzontale.

1.2.3 Vercelli

Le prime osservazioni meteorologiche nell'area del vercellese furono proposte dai medici dell'Ospedale Maggiore nel 1853 e hanno inizio, anche se in modo irregolare nel 1855; dal 1871 al 1909 si hanno informazioni sulla presenza di osservazioni regolari, interrottesi però in questa data. Successivamente dal 1927 vennero riprese le rilevazioni meteorologiche, ad opera dell'Ufficio Idrografico del Po, presso il Liceo Ginnasio "Lagrange" situato a circa 400 metri a Est dell'Ospedale Maggiore. Nel 1932 fu installato un vero e proprio Osservatorio Meteorologico a Villarboit, 15 km a Nord-Nord-Ovest da Vercelli, dove fu costruita appositamente una torretta per le osservazioni, elevata di circa 10 metri dal piano campagna. Nel 1940 gli strumenti furono trasferiti da Villarboit alla Cascina Boraso, posta a quota 134 m s.l.m. e a circa 3 km da Vercelli, in aperta campagna. Gli strumenti utilizzati a Cascina Boraso sono gli stessi utilizzati nella sede di Villarboit, sistemati alle stesse altezze dal suolo e nelle stesse posizioni; dal 1940 la stazione non è stata più spostata, fino al 2003 data della sua dismissione. Le misure pluviometriche dell'Osservatorio Meteorologico sono state condotte attraverso un pluviografo SIAP e controllate con un pluviometro totalizzatore giornaliero (Mercalli, 2004 e Cat Berro et al., 2004). Una sintesi degli spostamenti della stazione meteorologica è riportata in **tabella 3**.

Località	Longitudine E	Latitudine N	Quota [m s.l.m.]	Periodo di attività
Ospedale Maggiore	8° 23' 30"	45° 19' 00"	150	1871-1909
Liceo Ginnasio	8° 25' 00"	45° 19' 00"	130	1927-1939
Villarboit	8° 19' 59"	45° 27' 30"	175	1932-1939
Cascina Boraso	8° 21' 40"	45° 19' 50"	134	1940-2004

Tab. 3. Stazioni meteorologiche di Vercelli dal 1871 al 2004 (Cat Berro et al., 2004).

Nel luglio 1993, a circa 1 km a Est della Cascina Boraso, alla periferia Ovest di Vercelli, è stata installata una stazione meteorologica automatica, afferente alla rete Regionale e di competenza di ARPA Piemonte, che misura la temperatura dell'aria, le precipitazioni, l'umidità, il vento e la radiazione solare. Alla dismissione della stazione dell'Ufficio Idrografico ad oggi, è questa nuova stazione automatica che continua le rilevazioni meteorologiche, avendo verificato negli anni di sovrapposizione l'omogeneità delle sue misure con quelle effettuate dalle precedenti.

I pluviogrammi digitalizzati per questa stazione, ovvero per gli anni 1927-2003 sono quelli derivati dalla stazione dell'Ufficio Idrografico del Po, posta al Liceo Lagrange fino al 1939 e successivamente, dal 1940, quelli della stazione a Cascina Boraso; quindi, la stazione di osservazione utilizzata è stata spostata una sola volta durante il periodo per il quale si sono digitalizzati e analizzati i dati.

1.2.4 Digitalizzazione

Dall'analisi dei dati digitalizzati, per quanto riguarda le piogge di breve durata, per tutte e quattro le stazioni oggetto di studio, non si sono rilevate particolari influenze o effetti dovuti al cambiamento nella posizione o nel sito della stazione di misura, o della sensibilità strumentale.

Il recupero dei dati cartacei disponibili per le quattro stazioni riportate in **tabella 1**, è quindi stato effettuato attraverso la loro digitalizzazione e validazione, al fine di ottenere lunghe serie continue di dati di pioggia a passo temporale elevato.

Sono stati utilizzati programmi adatti alla conversione dei dati di pioggia da un formato cartaceo a un formato digitale per recuperare in tempi rapidi la grande quantità di informazioni registrate sui pluviogrammi.

I programmi utilizzati per la lettura automatica sono:

- GetData Graph Digitizer (<http://getdata-graph-digitizer.com>)
- Plot2Data: Software sviluppato dal CNR-ISAC per la digitalizzazione automatica di serie temporali registrati su cartogrammi (Leonardi et al., 2006).

Tutte quelle strisce che per diversi motivi non potevano essere lette in modo automatico con nessuno dei due software scelti, sono state lette manualmente; ad esempio non è stato possibile leggere quelle non ben conservate, o che hanno presentato tracce di muffa oppure quelle con linee scolorite dal tempo.

Sono stati riscontrati diversi tipi di modelli cartacei, tra cui:

- Modello1: foglio settimanale, pluviografo a bascula con tic di 0,2 mm fondo scala 10 mm con inversione del senso di tracciamento (**Fig. 1**).
- Modello2: foglio singolo con durata variabile, pluviografo a bascula con tic di 1 mm, scala orizzontale illimitata (entro il limite della carta), ritorno della penna ogni 24 ore con inversione del senso di tracciatura (**Fig. 2**).
- Modello3: foglio settimanale, avanzamento costante, fondo scala 10 mm con ritorno veloce della penna a zero (**Fig. 3**).



Fig. 1. Modello 1 - Stazione Vercelli

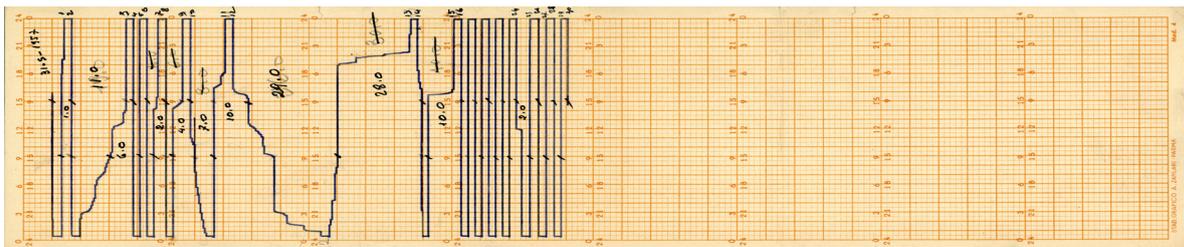


Fig. 2. Modello 2 - Stazione Bra

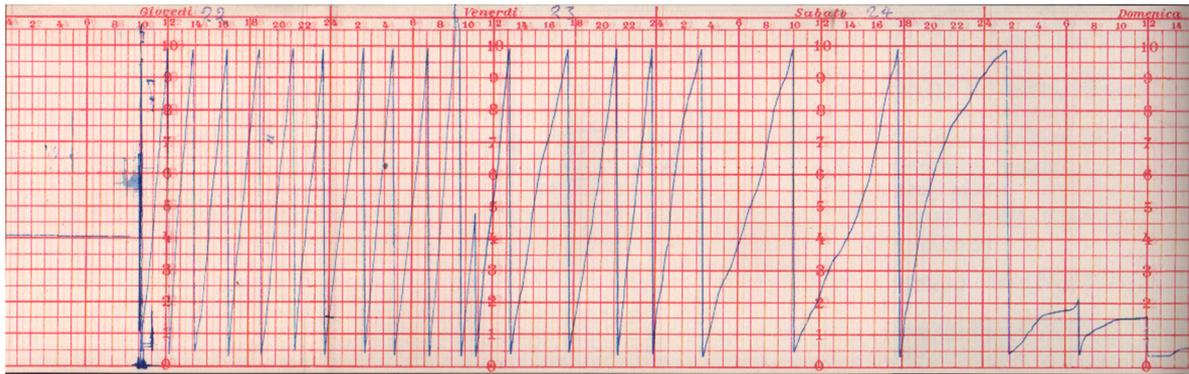


Fig. 3. Modello 3 – Stazione Pallanza

Sono stati riscontrati diversi fattori limitanti nella digitalizzazione dei dati:

- la conservazione del supporto cartaceo rappresenta un fattore critico. Con il passare degli anni, la carta si impolvera e si rovina, mentre le tracce sbiadiscono e diventano sempre meno leggibili;
- a volte lo stato di conservazione di questo supporto non consente neanche la lettura ad occhio del valore di precipitazione;
- in alcuni casi le tracce presentano “vuoti” maggiori di due ore (settimanali in un cartogramma);
- alcune tracce sono confuse con altre, a volte con i segni dell'operatore e, si nota la presenza di molti spot (macchie) ad esempio di inchiostro e/o di muffa;
- inoltre si sono trovati casi di saturazione, ovvero segni vicinissimi di salita e discesa del pennino sulla carta; fotocopie di pessime qualità, grandi macchie e doppie tracce (Fig. 4a-d);
- in tutti questi casi il software automatico di lettura (Plot 2Data) non è in grado di restituire valori corretti e coerenti e risulta necessaria una lettura manuale.



Fig. 4a. Fotocopie pessime

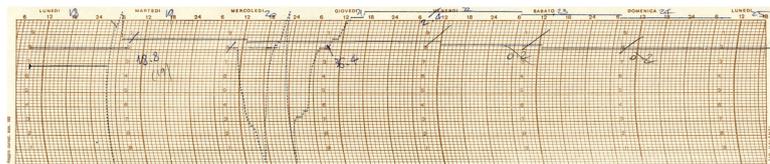


Fig. 4b. Doppia traccia

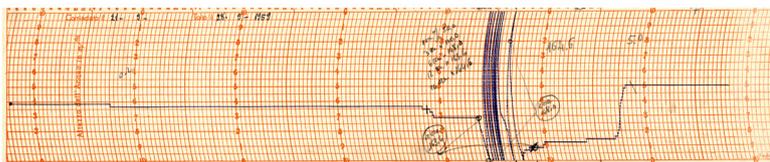


Fig. 4c. Saturazione

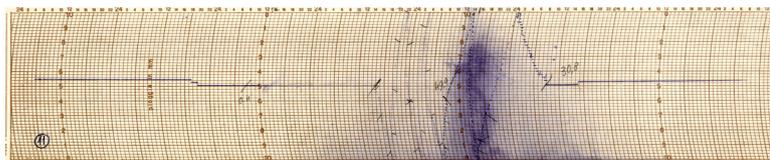


Fig. 4d. Enorme macchia

1.3. Metodologia

La scelta della metodologia di analisi dei dati digitalizzati, è stata fatta dopo una ricerca bibliografica approfondita. L'Organizzazione Mondiale di Meteorologia (OMM o WMO) distingue le variazioni a lungo termine in due grandi categorie o classi (Apadula e Cortesi, 2009), in altre parole in "trend" e in "change point". I segnali della prima classe si riferiscono a mutamenti caratterizzati da una graduale crescita o decrescita del valor medio e/o della varianza, mentre quelli della seconda riguardano cambiamenti bruschi e permanenti di tali grandezze.

Le finalità del lavoro di analisi sono state quelle di individuare e valutare le eventuali variazioni climatiche di alcuni aspetti specifici dei fenomeni piovosi, con particolare riguardo alle precipitazioni molto intense, e di mettere in luce se i fenomeni di precipitazioni estreme siano aumentati nel corso degli ultimi anni sia per quanto riguarda la frequenza degli eventi sia per quanto riguarda la loro intensità.

Con il termine di trend si intende un andamento non stazionario privo di irregolarità accidentale, che si evidenzia quando si considerano serie lunghe di dati. Il trend viene generalmente rappresentato con una funzione matematica di tipo semplice, come, ad esempio, un polinomio o una funzione esponenziale nel tempo.

In tutte le serie temporali sono sempre presenti delle irregolarità, di segno positivo e negativo rispetto alla media del fenomeno, che sembrano prodotte da un comportamento di tipo aleatorio. Tale componente si chiama casuale (Claps, 2002) ed assomma in sé gli elementi di incertezza (o aleatorietà) che caratterizzano i fenomeni naturali.

Esistono varie tecniche matematico/statistiche che permettono di valutare al meglio eventuali trend di lungo periodo per gli eventi estremi; tra tali tecniche la scelta è ricaduta sul test di Mann-Kendall per la stima del livello di significatività del trend.

Tutte le serie storiche acquisite dopo la fase di digitalizzazione sono state analizzate con il test non parametrico di Mann-Kendall, come descritto da Sneyers (1990), per individuare la presenza di eventuali trend ed è stato anche studiato il comportamento stagionale e annuale degli eventi estremi.

Il primo punto che è stato necessario chiarire è la definizione di ciò che costituisce un evento estremo: tale definizione risulta complessa in ambito scientifico, in quanto all'interno di categorie di ragionamento tendenzialmente oggettive, un evento estremo può essere selezionato in base o al superamento di una certa frequenza, o intensità o soglia oppure rispetto agli impatti fisici previsti (Ntegeka e Willems, 2008). In sostanza, tale definizione dipende dalla finalità d'uso con cui si valuta l'evento estremo, soprattutto in ambito di progettazione e programmazione.

Volendo dare una definizione più completa di un evento estremo, si può utilizzare quella del Long Term Ecological Research Network (LTER) degli Stati Uniti (Apadula e Cortesi, 2009), secondo la quale "gli eventi estremi sono fenomeni rari nella frequenza, intensità e/o durata, per una singola variabile o per una combinazione di grandezze meteorologiche, in un particolare ambiente e/o ecosistema". La capacità di riconoscere e di individuare gli eventi estremi è quindi fortemente dipendente dalla lunghezza e dall'affidabilità delle serie osservative di variabili meteorologiche a disposizione.

Per poter quindi identificare ed isolare gli eventi estremi avvenuti durante gli anni di osservazione analizzati, si sono utilizzati due indicatori di tali eventi: a) l'indicatore di frequenza e di intensità e b) i picchi oltre la soglia (POT Peaks Over Threshold).

1.3.1. Indici di eventi estremi

Oltre ai valori massimi annuali e stagionali, per valutare gli indicatori di frequenza ed intensità di cui sopra, sono stati calcolati per ogni anno due indici di precipitazioni estreme (Haylock e Nicholls, 2000):

- 1) il numero di eventi che superano il 95^{esimo} percentile, che fa riferimento all'indicatore di frequenza
- 2) l'intensità media di pioggia caduta durante gli eventi più estremi, che rappresenta l'indicatore di intensità.

L'indicatore di frequenza esamina i cambiamenti che riguardano il numero di eventi estremi. Per il calcolo di questo indice, si è scelto di utilizzare il 95^{esimo} percentile (che varia per ogni stazione), anziché seguire il metodo di Karl et al. (1995) che ha adottato una soglia fissa per tutte le stazioni. Infatti, una soglia fissa è poco pratica per le stazioni oggetto di studio, in quanto derivano da aree diverse, caratterizzate da una elevata variazione di intensità di pioggia. L'indice di frequenza è determinato contando il numero di eventi in un anno con intensità maggiore del 95^{esimo} percentile. Quest'approccio è simile a quello utilizzato da Karl e Knight (1998) che ha considerato i cambiamenti nelle frequenze o le probabilità di eventi estremi che superano un fissato percentile. È stato dimostrato (Karl e Knight, 1998) che gli aumenti delle precipitazioni totali sono fortemente influenzati da un aumento della frequenza e dell'intensità delle precipitazioni estreme, e che la percentuale di precipitazione totale annua, derivata da episodi di eventi intensi ed estremi, è aumentata. Riassumendo, per quanto riguarda le caratteristiche climatiche degli eventi estremi, si è adottato la convenzione di considerare estrema la precipitazione che, nella scala ordinata in senso crescente dei valori misurati, supera il 95^{esimo} percentile, vale a dire quella che si presenta con frequenza minore del 5%, per ognuna delle scale temporali da 5 minuti a 12 ore per tutte le stazioni eccetto Bra, che ha dati su base temporale a partire da un'ora.

L'indicatore d'intensità rappresenta i cambiamenti nella media di tutti gli eventi superiori al percentile scelto. Questo indice è stato calcolato utilizzando due metodi differenti:

- 1) la media dei quattro eventi più grandi in termini di altezza di precipitazione per ogni anno;
- 2) la media di tutti gli eventi maggiori del 95^{esimo} percentile.

Per ciascuna scala temporale è stato considerato l'andamento nel tempo di questi indici di eventi rari, calcolando la retta di trend. La valutazione della significatività del trend, calcolato sulla base di un lungo periodo per gli eventi estremi, è stata ricavata usando il test di Mann-Kendall

1.3.2 Test di Mann-Kendall

Il metodo di Mann-Kendall è molto utilizzato in idrologia e climatologia per verificare la presenza di trend soprattutto per la sua robustezza rispetto all'influenza dei valori estremi e per la presenza in tali serie di distribuzioni di frequenza non necessariamente di tipo normale (Capra et al. 2011).

Questo test definisce (Camuffo e Pagan, 2005):

- i) quando un trend è significativo;
- ii) il suo segno;
- iii) dove orientativamente questo segno inizia, se all'inizio o dove all'interno della serie.

Ipotesi del test: H_0 - assenza di una tendenza nella serie dei dati

H_1 - presenza di una tendenza

Sia x_1, \dots, x_n una serie di dati.

Per ogni elemento x_i della serie si determina il numero n_i di elementi che lo precedono, tali che $x_i > x_j$

La funzione di distribuzione di t pari a $t = \sum_i n_i$ è asintoticamente normale con media e varianza pari a:

$$E(t) = \frac{n(n-1)}{4} \quad \text{e} \quad \text{var}(t) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

Statistica del test:

$$u(t) = \frac{[t - E(t)]}{\sqrt{\text{var}(t)}}$$

Il test verifica l'ipotesi nulla (H_0) di assenza di tendenza, associando ai valori di $u(t)$ ricavati per ciascuna serie, un valore di probabilità α_1 che rappresenta proprio la significatività dell'ipotesi nulla:

$$\alpha_1 = P(|u| > |u(t)|)$$

La verifica della presenza di una tendenza avviene quindi in maniera indiretta, per rifiuto dell' H_0 , quando la significatività α_1 della serie esaminata risulta inferiore alla soglia di accettazione α_0 ($\alpha_1 < \alpha_0$), assunta in questo caso pari a 0,05. La direzione del trend, negativa o positiva, viene data dal segno delle variabili $u(t)$.

1.3.3. Peaks-Over-Threshold (POT)

Lo strumento più utilizzato per modellizzare gli eventi più elevati è la teoria dei valori estremi. All'interno di questa teoria il metodo più comunemente usato è il conteggio dei superamenti di una certa soglia (vedere il 95^{esimo} percentile discusso al paragrafo 1.3.1) o dei picchi oltre la soglia, chiamato anche POT dall'inglese Peaks Over Threshold (Davison e Smith, 1990). Inizialmente questo metodo è stato sviluppato per l'analisi dei dati idrogeologici ma a partire dalla seconda metà degli anni '70 ha trovato una sempre maggiore applicazione in più campi.

I valori di precipitazione oltre una certa soglia, opportunamente selezionati, saranno modellati tramite GPD (Generalized Pareto Distribution). L'approccio Peaks-Over-Threshold (POT) è una tecnica che sfrutta il fatto che la distribuzione delle eccedenze ha proprietà asintotiche simili a quelle delle distribuzioni dei valori estremi come la GPD e che non considera solamente i valori massimi annuali.

Questo fatto permette di utilizzare il metodo anche in presenza di un minor numero di osservazioni e per questo spesso è preferibile ad altri. L'intervallo di attesa (o separazione) tra due eventi piovosi indipendenti successivi è stato stimato in 12 ore (Ntegeka e Willems, 2008).

Un primo problema che riguarda la modellizzazione degli eventi estremi con il metodo dei POT è la scelta del valore soglia. Il valore del Threshold selezionato, infatti, influenza il valore stimato del parametro di forma ξ della distribuzione GPD.

In particolare, questa quantità dev'essere grande abbastanza in modo da poter considerare estreme le osservazioni superiori ad essa: scegliere una soglia $u(t)$ troppo piccola implicherebbe stime distorte degli altri parametri (Coles, 2001).

D'altra parte, la scelta di una soglia $u(t)$ troppo alta implicherebbe un minor numero di osservazioni con cui stimare i parametri della GPD, e quindi una maggiore variabilità delle stime. Nella prati-

ca, il metodo che è stato adottato per la scelta di questa soglia parte dalla stima dei due parametri della distribuzione GPD per diversi valori di essa, e arriva ad osservare l'andamento della distribuzione, così da stabilire se il valore soglia scelto è corretto oppure no.

I suddetti parametri presenti nell'espressione che definisce la GPD sono:

- 1) il parametro di scala che rappresenta la dispersione della distribuzione
- 2) il parametro di forma.

Questi due parametri sono stati stimati usando il metodo degli L-moments (Hosking JRM and Wallis JR. 1997).

Le elaborazioni sono state effettuate tramite lo strumento di statistica: R Development Core Team (<http://www.r-project.org/>).

1.4. Analisi dei risultati

Come indicato in precedenza, sono stati adottati diversi indici per l'analisi delle lunghe serie storiche di precipitazioni, dato che non esiste un indice unico in grado di verificare e descrivere in modo completo i cambiamenti nelle serie temporali di eventi estremi. Le stagioni sono state definite secondo la definizione standard: inverno (dicembre, gennaio, febbraio), primavera (marzo, aprile, maggio), estate (giugno, luglio, agosto), autunno (settembre, ottobre, novembre). Per ogni stazione pluviometrica sono stati calcolati i diversi indici per la valutazione degli eventi estremi e ciascun indice è poi stato sottoposto al test statistico di Mann-Kendall.

1.4.1 Massimi annuali

Per quanto riguarda i massimi annuali, dall'analisi dei dati si è ricavato che l'unica tendenza significativa è quella dell'aumento della precipitazione massima annua, registrata nella stazione di Bra per una durata di 12 ore (Fig. 5). Per le altre scale temporali e per tutte le stazioni studiate, l'andamento non è significativo.

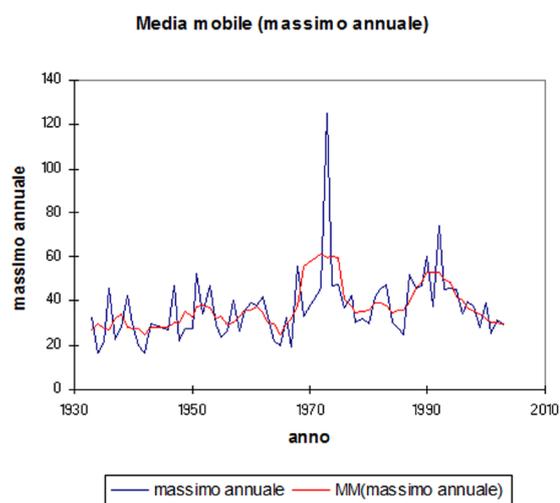


Fig. 5. Media mobile a 5 anni, del massimo annuale: precipitazione di durata 12 ore (stazione di Bra).

1.4.2 Massimi stagionali

Per quanto riguarda i massimi stagionali e per le precipitazioni a scala sub oraria, l'andamento delle precipitazioni non risulta caratterizzato da trend particolarmente significativi, se non una tendenza crescente del massimo primaverile per le stazioni di Bra e Lombriasco (Tab. 4, Fig. 6).

Durata	Pallanza	Vercelli	Lombriasco	Bra
1 ora	NS	NS	NS	NS
2 ore	NS	NS	NS	NS
3 ore	NS	NS	+	+
6 ore	NS	NS	+	+
12 ore	NS	NS	NS	+

NS: non significativo

Tab. 4. Risultati dell'applicazione del test di Mann-Kendal per i massimi primaverili.

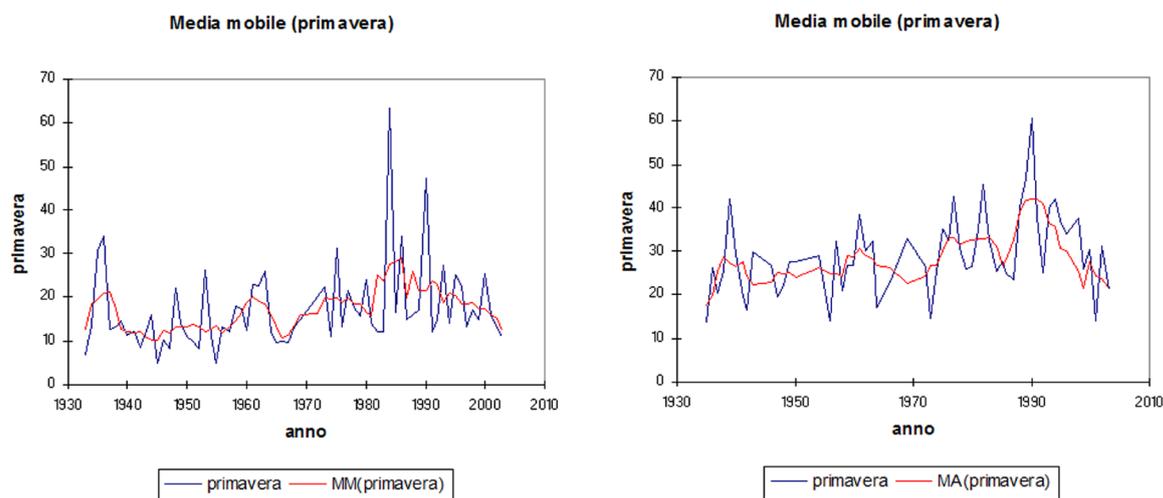


Fig.6. Media mobile di 5 anni del valore massimo di precipitazione primaverile per la stazione di Bra: durata (sx) 3 ore (b) e 6 ore (dx) 12ore

1.4.3 Indicatore di frequenza

Per quanto riguarda l'indicatore di frequenza, nella stazione di Pallanza, l'unica scala temporale che presenta un incremento significativo è quella di 30 minuti. Tutte le altre stazioni non hanno registrato nessun cambiamento nell'indicatore di frequenza per le scale temporali minori di un'ora. Per la stazione di Vercelli l'indicatore di frequenza ha definito un incremento significativo solo per eventi di durata di un'ora.

Le stazioni di Bra e Lombriasco sono quelle dove si sono registrate delle tendenze simili per quanto riguarda l'indicatore di frequenza; probabilmente questo può essere dovuto alla relativa vicinanza delle due stazioni (Fig. 7).

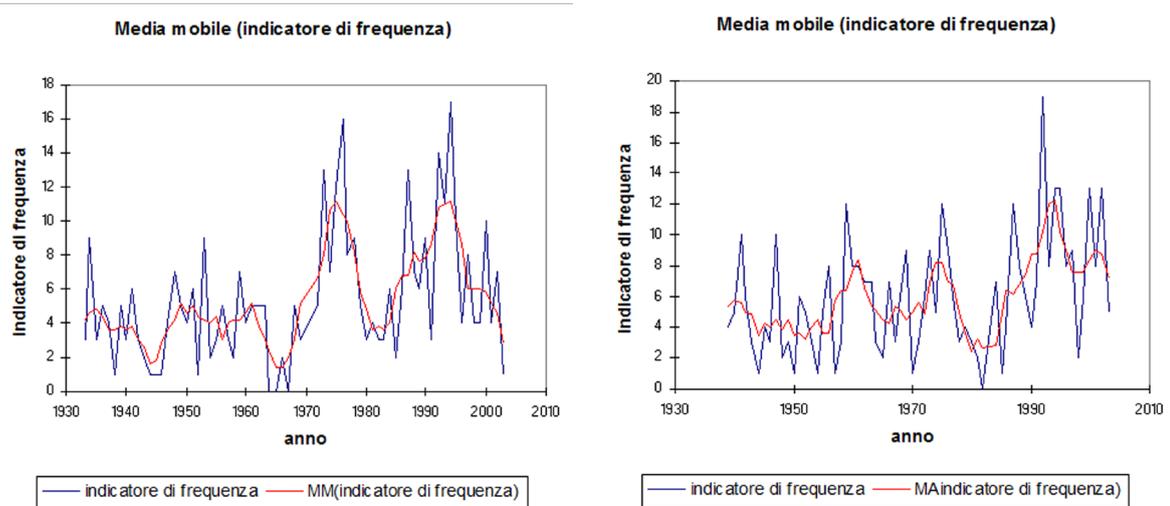


Fig. 7. Media mobile di 5 anni dell'indicatore di frequenza per le precipitazioni di durata 30re: Bra (sx), Lombriasco (dx)

1.4.4 Indicatore di intensità

Relativamente all'indicatore di intensità, nella stazione di Vercelli non è stato registrato nessuna tendenza significativa per tutte le scale temporali.

La stazione di Pallanza ha mostrato un aumento significativo dell'indicatore di intensità estrema per la durata di 30 minuti: stesso risultato per l'indicatore di frequenza (vedi paragrafo 1.4.3). Questo aumento nell'intensità e nella frequenza di eventi di pioggia con scala temporale sotto l'ora è dovuto al fatto che la stazione di Pallanza si trova nel bacino imbrifero del lago Maggiore caratterizzato mediamente da una elevata piovosità, 1662 mm medi annui (Ciampittiello et al., 2011) contro la media annua del territorio piemontese variabile tra i 921 mm e i 1094 mm (<http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/approfondimenti/clima/clima-piemonte/intro.html>) e quindi caratterizzata da una presenza significativa anche degli eventi estremi, in netta crescita, soprattutto quelli di breve durata.

L'unica tendenza al decremento è stata registrata nella stazione di Bra per la precipitazione di durata pari a un'ora (Fig. 8).

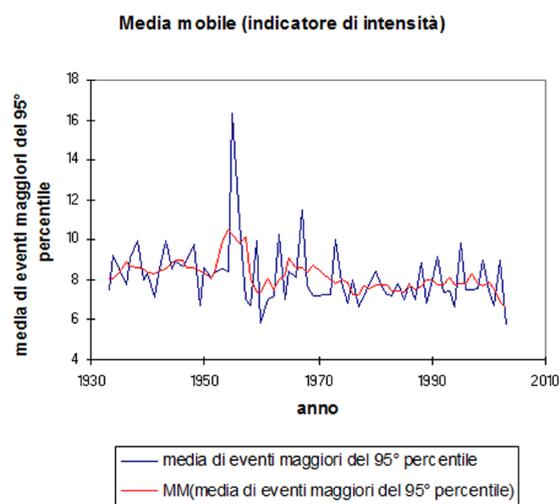


Fig. 8. Media mobile a 5 anni dell'indicatore di intensità: precipitazione di durata un'ora (stazione di Bra)

1.4.5 Peaks over threshold

Per lo studio degli eventi estremi, si è applicato anche il modello POT ai dati pluviometrici raccolti, al fine di analizzare le modifiche della curva di crescita degli ultimi venti anni, rispetto a tutti i dati della serie temporale delle precipitazioni brevi ed intense a disposizione (le curve di crescita sono esaminate con il metodo degli L-moments). Come riportato in precedenza, i POT dei valori estremi sono stati estratti utilizzando il software R (<http://www.r-project.org/>).

Dovendo lavorare su lunghe serie temporali è importante selezionare solo gli eventi indipendenti tra loro: il criterio di indipendenza si basa su una procedura di estrazione del valore di POT di precipitazione, simile a quella di estrazione dei POT per i flussi (Ntegeka e Willems, 2008). Il criterio di indipendenza per gli eventi di pioggia considera che due eventi consecutivi sono indipendenti se l'occorrenza di un evento non influenza l'altro. Ntegeka e Willems (2008) hanno proposto per l'analisi del valore estremo basato sulle serie di precipitazioni, un minimo di 12 ore come tempo di inter-evento, considerando così due eventi che accadono nello stesso giorno o di notte come un unico evento.

Inizialmente si è scelta una soglia relativamente bassa, per poter estrarre più eventi, così da poter selezionare successivamente una soglia ragionevole per l'approssimazione asintotica del GPD; in questo modo alcuni eventi inizialmente scelti, non risultano estremi nel senso stretto del termine. Un esempio della procedura adottata è riportata qui di seguito. Dalla **figura 9** si evince che la scelta di un valore soglia di 10 mm potrebbe essere ragionevole, per la serie di un'ora di precipitazione per la stazione di Vercelli. La soglia selezionata deve essere sufficientemente bassa per avere abbastanza eventi di cui sopra, per ridurre la varianza, ma nello stesso tempo non troppo bassa per non aumentare troppo il bias, ovvero la differenza tra il valore stimato e quello reale. Ri-estraendo gli eventi maggiori della soglia di 10 mm si va a verificare la correttezza o meno della scelta iniziale.

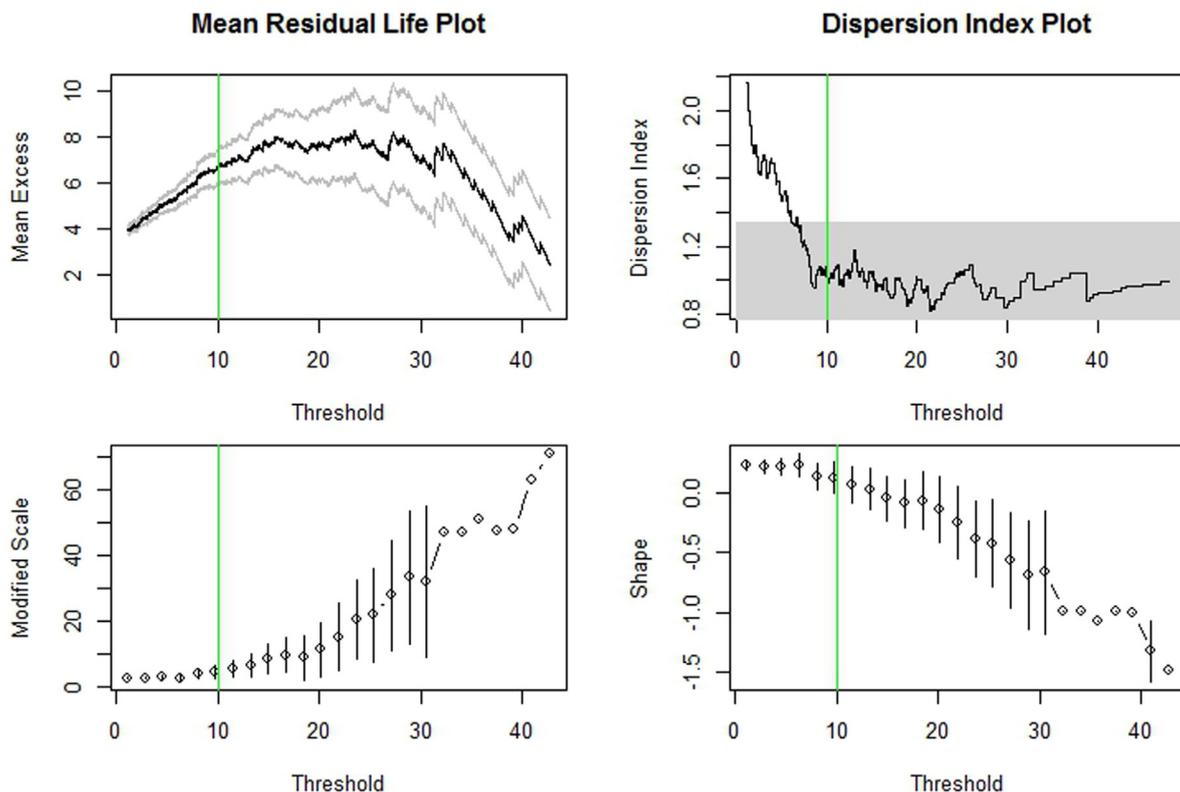


Fig. 9. Selezione del Threshold per le precipitazioni di durata di un'ora (Vercelli)

La **figura 10** mostra l'esame diagnostico, rappresentato dal grafico, del modello GPD adottato. Si può notare che in questo caso la soglia scelta sembra appropriata.

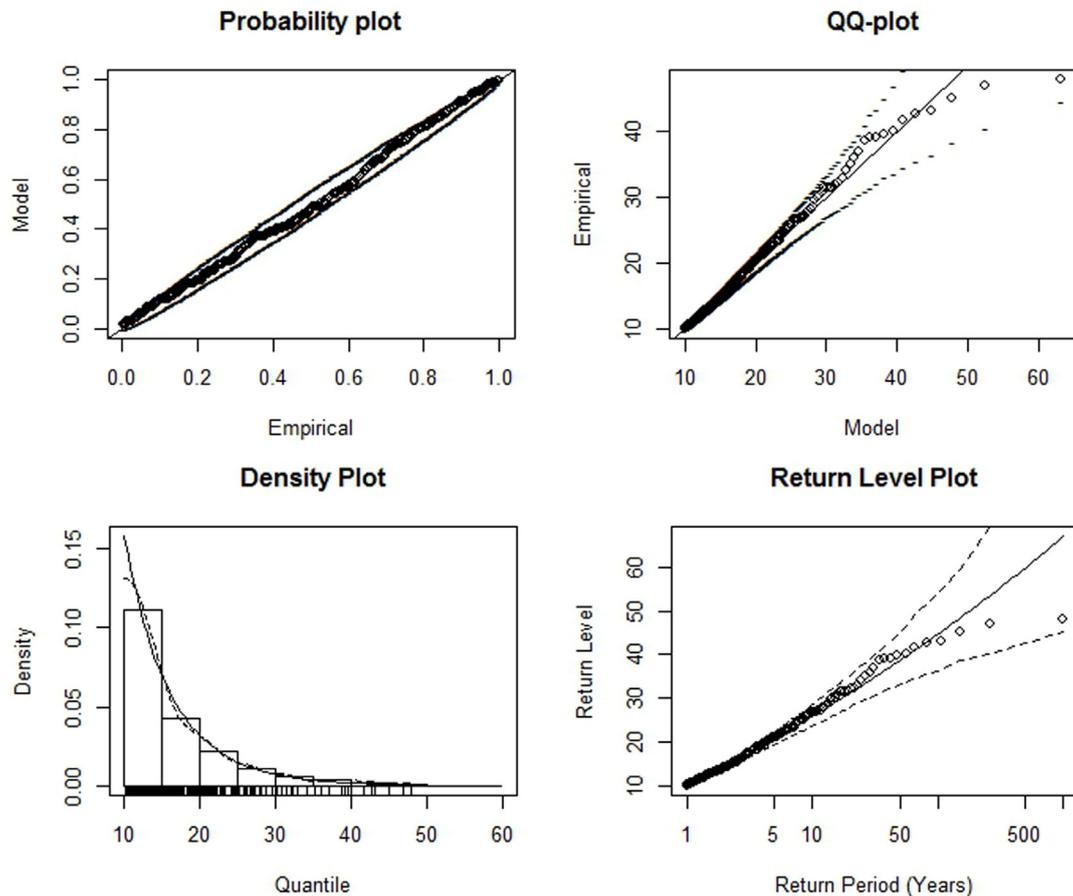


Fig. 10. Grafico diagnostico (precipitazione di un'ora – stazione di Vercelli)

La **tabella 5** mostra le soglie selezionate per la stazione di Vercelli e per le diverse durate temporali utilizzate per le analisi. Questi valori rappresentano il punto di partenza per il calcolo della serie POT per ogni scala temporale.

Scala temporale (ora)	1	2	3	6	12
Soglia (mm)	10	13	15	25	34

Tab. 5. Esempio di soglia oltre la quale sono state calcolate le serie POT: stazione di Vercelli.

Le serie POT estratte dai dati di precipitazione raccolti nelle diverse stazioni con alta risoluzione (5, 10, 15, 20, 30 minuti e 1, 2, 3, 6, 12 ore) sono state utilizzate per produrre curve di crescita attraverso una distribuzione dei valore estremi (GPD nel nostro caso).

È stato quindi fatto un confronto tra le curve di crescita generate dalle serie POT, ricavate dalla lunga serie storica, e quelle che fanno riferimento agli ultimi venti anni.

Esaminando la curva di crescita si è visto che essa si è accentuata ed i recenti eventi di precipitazione brevi ed intensi sono aumentati nel corso degli ultimi venti anni (1984-2003), rispetto alla serie storica esaminata (1927-2003 per quanto riguarda Vercelli), nel caso di una scala temporale minore

di un'ora. Questo andamento è molto più evidente nella stazione di Lombriasco (Fig.11) rispetto alla stazione di Vercelli (Fig. 12).

Più la scala temporale diventa grande, ovvero maggiore è la durata degli eventi, più questi, rispetto agli ultimi venti anni, cominciano ad avvicinarsi agli eventi ricavati per la serie storica utilizzata, fino ad arrivare a una scala di 12 ore, dove si nota un decremento di questi eventi recenti rispetto al passato (Fig. 13).

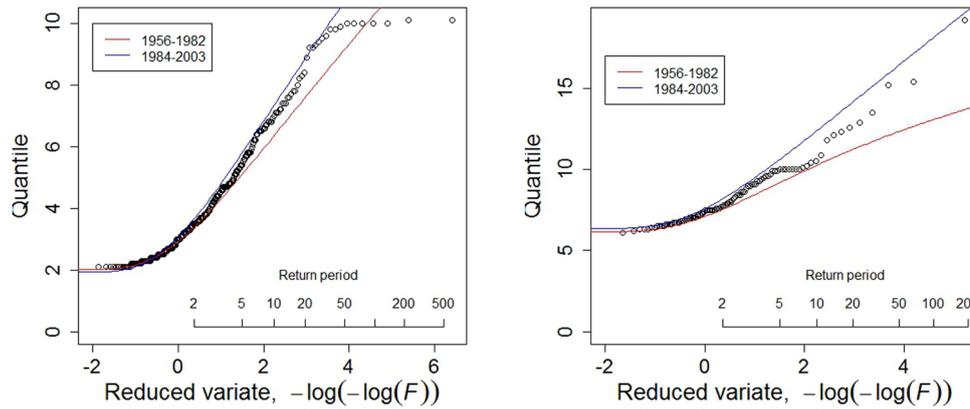


Fig. 11. Cambiamento negli eventi estremi rispetto agli ultimi venti anni: stazione di Lombriasco per durate: 5 min (sx) e 10 min (dx)

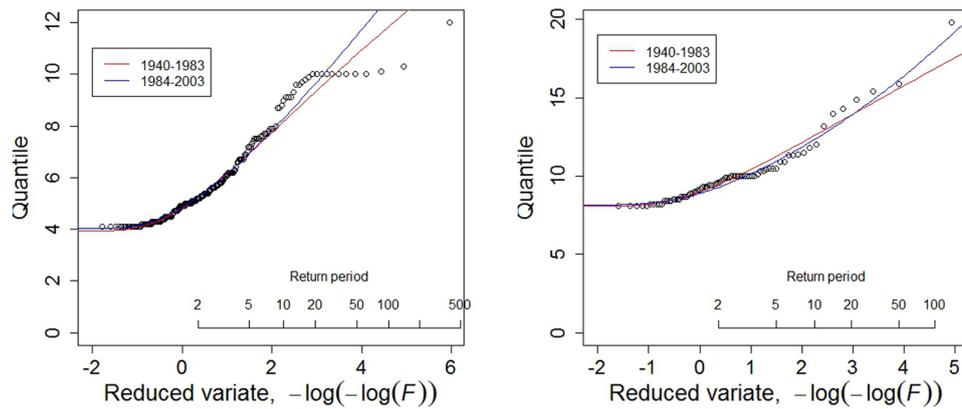


Fig. 12. Cambiamento negli eventi estremi rispetto agli ultimi venti anni: stazione di Vercelli per durate: 5 min (sx) e 10 min (dx)

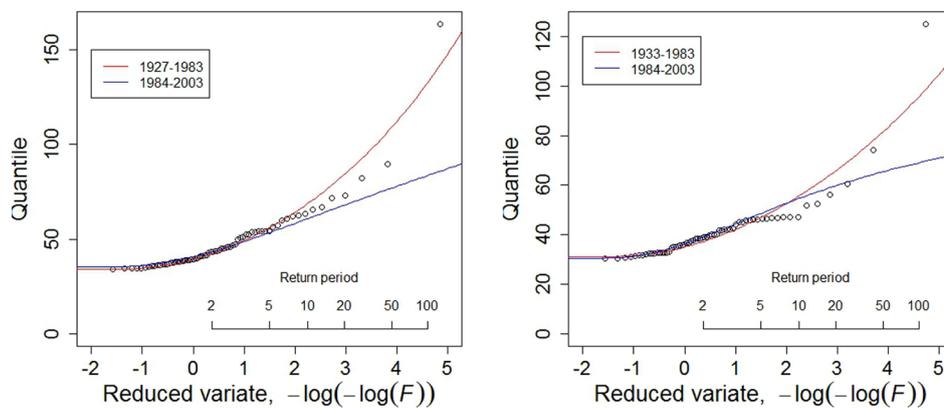


Fig. 13. Diminuzione degli eventi estremi rispetto agli ultimi 20 anni: stazione di Vercelli (sx) e Bra (dx) per durate di 12 h.

1.5 Conclusioni

La parte iniziale del lavoro è stata quella di raccogliere le serie storiche attraverso la digitalizzazione dei dati dal formato cartaceo; si è poi proceduto alle analisi statistiche sulle serie temporali ottenute, con dettaglio orario e sub-orario dove possibile, al fine di analizzare l'andamento degli eventi di breve durata e forte intensità, che giocano un ruolo fondamentale nei processi di instabilità di versante, nella formazione delle colate detritiche, nelle piene improvvise e nella globale gestione della risorsa idrica e del territorio.

Le analisi dei trend degli eventi estremi, eseguite usando il test di Mann-Kendall e il calcolo di alcuni indici di eventi climatici estremi, hanno dato i seguenti principali risultati:

- su base annua, la precipitazione massima annuale è stazionaria per tutte le stazioni studiate e per tutte le durate eccetto per la stazione di Bra, dove è stato registrato un aumento con una scala temporale di 12 ore;
- su base stagionale, si è rilevata una crescita delle precipitazioni intense primaverili per le stazioni di Lombriasco e Bra, stazioni abbastanza vicine tra loro rispetto alle altre due;
- nella maggior parte dei casi, il segno positivo del trend dell'indice di intensità estrema, corrisponde alla tendenza del massimo primaverile;
- per la stazione di Pallanza l'unica scala temporale che presenta un incremento significativo è quello di trenta minuti per quanto riguarda l'indice di intensità. Questo è dovuto al fatto che si è verificato che gli eventi intensi in questa zona, sono generalmente molto brevi in termine di durata;
- le stazioni di Bra e Lombriasco sono quelle con tendenze simili per quanto riguarda l'indicatore di frequenza, probabilmente legato alla vicinanza geografica delle due stazioni;
- l'unica tendenza al decremento è stata registrata nella stazione di Bra per le precipitazioni di durata di un'ora.

Le serie POT estratte dai dati di precipitazione raccolti nelle diverse stazioni sono servite alla stima della curva di crescita per ogni stazione e per ogni scala temporale. Le curve così ottenute mostrano che gli eventi brevi di precipitazione sono aumentati nel corso degli ultimi venti anni per scale temporali basse, ovvero da 5 a 60 minuti. Più la scala temporale aumenta, però, più questi eventi risultano diminuire rispetto al passato.