



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

Analisi non stazionaria delle precipitazioni estreme e implicazioni sulla stima delle portate di progetto

Candidato: Michele Damiani

Relatore: Prof. Giuseppe Barbero

A.A.2024/2025

INDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Introduzione | 5 |
| 2. | Dati Pluviometrici | 7 |
| 2.1 | Area Di Studio | 7 |
| 2.2 | Ricostruzione Dati Mancati Con Metodo Idwm..... | 15 |
| 3. | Analisi Precipitazione Estreme | 23 |
| 3.1 | Neva | 23 |
| 3.2 | Dati Di Input Di Neva | 27 |
| 3.3 | File Di Output Di Neva | 34 |
| 3.4 | Analisi Del Trend | 37 |
| 4. | Costruzione Curve Di Possibilita' Pluviometrica | 43 |
| 4.1 | Risultati Anomali | 50 |
| 4.1.1 | Metodo Della Massima Verosimiglianza..... | 56 |
| 4.1.2 | Confronto Risultati | 58 |
| 5. | Applicazione A Un Caso Studio: Vasca Di Laminazione Sul Torrente Muson 63 | |
| 5.1 | Determinazione Del Tempo Di Corrivazione E Del Curve Number | 64 |
| 5.2 | Costruzione Dello Ietogramma Chicago..... | 68 |
| 5.3 | Determinazione Portata Al Colmo Tramite Hec-Hms | 80 |
| 6. | Conclusioni | 92 |
| 7. | Bibliografia | 94 |

1. INTRODUZIONE

Lo studio dell'analisi di precipitazione, in particolare delle precipitazioni intense, è una tematica fondamentale per quanto riguarda l'ingegneria idraulica, in quanto questi fenomeni sono sempre più responsabili di eventi naturali potenzialmente catastrofici, quali ad esempio piene, esondazioni, allagamenti e dissesti idrogeologici. Per questo motivo la loro corretta caratterizzazione gioca un ruolo fondamentale nella progettazione e nella verifica di opere idrauliche.

Negli ultimi decenni l'attenzione verso questi eventi estremi è aumentata sempre di più in seguito ai possibili effetti dei cambiamenti climatici che ne hanno comportato un aumento della frequenza e dell'intensità.

Al fine di poter svolgere nella maniera più corretta e precisa possibile quest'analisi è necessario disporre di serie di precipitazioni storiche affidabili e sufficientemente lunghe. Tuttavia, queste serie di dati di precipitazione spesso mostrano importanti lacune temporali che potrebbero essere state causate da diverse ragioni, come ad esempio l'interruzione nel sistema di monitoraggio. Questa è una tematica molto importante in quanto la mancanza di dati può andare a compromettere l'affidabilità dell'analisi che vogliamo andare a svolgere.

Nella seguente tesi viene trattato il caso della regione Veneto, analizzando i dati di precipitazione massime annuali per diverse durate per determinate stazioni pluviometriche.

Il problema della mancanza di dati è stato trattato tramite l'utilizzo del metodo IDWm, una tecnica basata sull'interpolazione spaziale che consente di andare a stimare i valori assenti analizzando le informazioni delle stazioni pluviometriche vicine. La sua applicazione si è resa necessaria in seguito all'elevato grado di incompletezza delle serie analizzate.

Una volta ricostruiti i dati mancanti delle diverse serie di precipitazione per ogni stazione, è stata condotta un'analisi statistica mediante l'utilizzo del codice MATLAB NEVA (Nonstationary Extreme Value Analysis) che ha permesso di

andare a determinare i parametri della distribuzione GEV (Generalized Extreme Value) sia in condizioni stazionarie che no. Nell'analisi che è stata condotta si è considerato un modello di tipo non stazionario. In contemporanea è stata anche effettuata un'analisi del trend delle diverse serie temporali mediante il test di Mann-Kendall andando a considerare diversi livelli di significatività.

Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi di trend sono state calcolate le curve di possibilità pluviometrica (CPP) per determinate stazioni e per diversi tempi di ritorno, utilizzando sia i parametri restituiti dal codice NEVA per il modello stazionario e per il modello non stazionario tramite metodo bayesiano, che tramite il metodo della massima verosimiglianza.

Le curve di possibilità pluviometrica, mettendo in relazione l'altezza di precipitazione con la durata dell'evento, costituiscono uno strumento molto importante nel contesto della progettazione idraulica, a tal proposito, i risultati ottenuti sono stati utilizzati per analizzare un caso pratico reale ovvero, il progetto della vasca di laminazione del torrente Muson, in provincia di Treviso (Veneto), calcolandosi il valore della portata alla sezione di chiusura.

2. DATI PLUVIOMETRICI

2.1 AREA DI STUDIO

Nel seguente caso studio sono state analizzate diverse stazioni pluviometriche appartenenti alla regione Veneto. Per ciascuno di esse i dati di precipitazione sono stati ottenuti dagli annali idrologici e successivamente integrati con quelli dell'ARPA Veneto fino all'anno 2024.

I dati utilizzati sono i massimi annuali di precipitazione. Per ogni anno viene quindi individuato il massimo valore di precipitazione per una determinata durata e in questo modo si ottiene una serie temporale di un valore per anno per ogni durata che mi rappresenta l'evento più intenso che si è verificato. Come durate di precipitazione sono state considerate 1 ora, 3 ore, 6 ore, 12 ore e 24 ore. Nella *tabella 2.1* si riportano: l'elenco delle stazioni di partenza (riportate anche in *figura 2.1*), con relativi codici identificati, coordinate spaziali WGS84 [1]. In *tabella 2.2* invece, si riporta la percentuale dei dati mancati per ciascuna delle stazioni di partenza.

| Codice | Stazione | Latitudine | Longitudine | Quota | Data inizio rilevazioni |
|---------------|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------|--------------------------------|
| V001 | Conegliano | 45,887 | 12,29 | 71 | 1928 |
| V002 | Sappada | 46,57 | 12,70 | 1265 | 1966 |
| V003 | Santo Stefano di Cadore | 46,55 | 12,55 | 908 | 1928 |
| V004 | Auronzo | 46,55 | 12,42 | 864 | 1928 |
| V005 | Cortina d'Ampezzo | 46,53 | 12,12 | 1275 | 1928 |
| V006 | Perarolo di Cadore | 46,39 | 12,35 | 532 | 1929 |
| V007 | Longarone | 46,26 | 12,3 | 474 | 1964 |
| V008 | Forno di Zoldo | 46,34 | 12,18 | 848 | 1928 |
| V012 | Belluno | 46,13 | 12,19 | 400 | 1928 |
| V013 | Sant'Antonio di Tortal | 46,04 | 12,15 | 513 | 1955 |
| V014 | Arabba | 46,49 | 11,87 | 1612 | 1984 |
| V015 | Caprile | 46,44 | 11,99 | 1023 | 1928 |
| V016 | Agordo | 46,27 | 12,03 | 611 | 1928 |
| V017 | Gosaldo | 46,23 | 11,95 | 1141 | 1928 |
| V018 | Feltre | 46,01 | 11,89 | 264 | 1935 |
| V019 | Valdobbiadene | 45,88 | 12,00 | 280 | 1959 |
| V021 | Portogruaro | 45,74 | 12,76 | 6 | 1929 |
| V023 | Oderzo | 45,76 | 12,52 | 13 | 1929 |
| V031 | Bassano del Grappa | 45,78 | 11,73 | 129 | 1928 |
| V034 | Villorba | 45,74 | 12,23 | 38 | 1928 |
| V035 | Treviso | 45,68 | 12,22 | 15 | 1928 |
| V040 | Cittadella | 45,65 | 11,79 | 49 | 1934 |
| V041 | Castelfranco Veneto | 45,69 | 11,94 | 44 | 1928 |
| V047 | Chioggia | 45,14 | 12,27 | 1 | 1936 |
| V049 | Asiago | 45,86 | 11,51 | 1046 | 1928 |
| V050 | Posina | 45,78 | 11,26 | 544 | 1955 |
| V052 | Valli del Pasubio | 45,75 | 11,21 | 602 | 1929 |
| V054 | Vicenza | 45,55 | 11,55 | 42 | 1931 |
| V059 | Chiampo | 45,53 | 11,29 | 180 | 1928 |
| V060 | Padova | 45,39 | 11,88 | 12 | 1936 |
| V061 | Legnaro | 45,34 | 11,95 | 7 | 1965 |
| V066 | Ospedaletto Euganeo | 45,23 | 11,60 | 9 | 1928 |
| V071 | Villafranca Veronese | 45,37 | 10,83 | 54 | 1964 |
| V074 | Rovigo | 45,09 | 11,72 | 4 | 1928 |
| V075 | Adria | 45,05 | 12,05 | 1 | 1983 |

Tabella 2.1 Elenco stazioni pluviografiche

| Codice | Stazione | % dati mancati |
|---------------|-------------------------|-----------------------|
| V001 | Conegliano | 58 |
| V002 | Sappada | 34 |
| V003 | Santo Stefano di Cadore | 14 |
| V004 | Auronzo | 9 |
| V005 | Cortina d'Ampezzo | 12 |
| V006 | Perarolo di Cadore | 15 |
| V007 | Longarone | 25 |
| V008 | Forno di Zoldo | 10 |
| V012 | Belluno | 35 |
| V013 | Sant'Antonio di Tortal | 4 |
| V014 | Arabba | 0 |
| V015 | Caprile | 22 |
| V016 | Agordo | 8 |
| V017 | Gosaldo | 12 |
| V018 | Feltre | 24 |
| V019 | Valdobbiadene | 6 |
| V021 | Portogruaro | 5 |
| V023 | Oderzo | 15 |
| V031 | Bassano del Grappa | 12 |
| V034 | Villorba | 15 |
| V035 | Treviso | 20 |
| V040 | Cittadella | 15 |
| V041 | Castelfranco Veneto | 8 |
| V047 | Chioggia | 20 |
| V049 | Asiago | 12 |
| V050 | Posina | 8 |
| V052 | Valli del Pasubio | 8 |
| V054 | Vicenza | 11 |
| V059 | Chiampo | 21 |
| V060 | Padova | 24 |
| V061 | Legnaro | 5 |
| V066 | Ospedaletto Euganeo | 24 |
| V071 | Villafranca Veronese | 13 |
| V074 | Rovigo | 20 |
| V075 | Adria | 0 |

Tabella 2.2 Percentuale dati mancanti

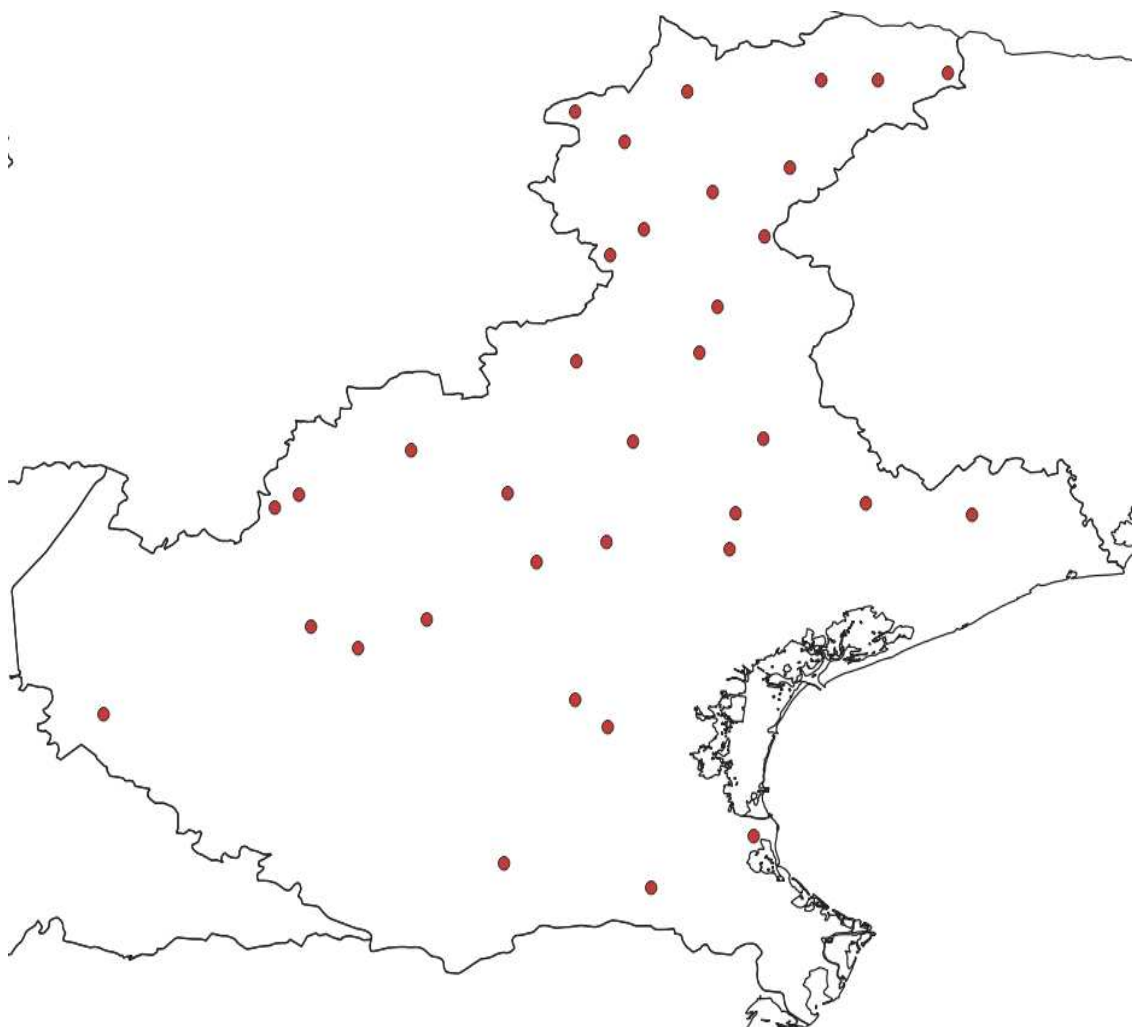


Figura 2.1 Posizione stazioni pluviografiche

Le diverse serie storiche sono caratterizzate da un numero non trascurabile di dati mancanti per tutte le stazioni pluviografiche.

A titolo di esempio, nella *tabella 2.3* è riportata la serie originale delle precipitazioni massime annue [1] della stazione di Treviso, nella quale vi sono diversi dati mancanti.

| anno | 1 | 3 | 6 | 12 | 24 |
|------|------|------|----|----|------|
| 1928 | 8 | 21 | 25 | 36 | 65 |
| 1929 | 29.6 | 31.1 | 38 | 60 | 82.4 |

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|-------|
| 1930 | 42.4 | 43.4 | 45.2 | 80 | 89 |
| 1931 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1932 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1933 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1934 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1935 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1936 | 35.4 | 35.4 | 35.4 | 47 | 61.6 |
| 1937 | 25.7 | 35 | 46.5 | 71.4 | 116.8 |
| 1938 | 20.4 | 23.2 | 29.4 | 33 | 40.6 |
| 1939 | 40.8 | 47 | 71 | 118 | 118 |
| 1940 | 22 | 23.5 | 27 | 43 | 73 |
| 1941 | 21 | 26 | 33 | 64 | 77.2 |
| 1942 | 34.9 | 34.9 | 40.2 | 45.4 | 45.4 |
| 1943 | 25 | 32 | 35 | 39 | 54.4 |
| 1944 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1945 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1946 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1947 | 39 | 39.2 | 50.5 | 104 | 125 |
| 1948 | 33 | 33.7 | 36.5 | 40 | 67.7 |
| 1949 | 36 | 48.3 | 49.3 | 51 | 82.5 |
| 1950 | 30.4 | 30.4 | 32 | 34 | 46.8 |
| 1951 | 29.8 | 33.2 | 35.8 | 52 | 68 |
| 1952 | 24.2 | 25 | 40 | 75.4 | 93.4 |
| 1953 | 29.8 | 47.6 | 52 | 73 | 118.8 |
| 1954 | 25 | 27 | 37.4 | 43.8 | 44 |
| 1955 | 25 | 38.2 | 39.4 | 48.6 | 60.6 |
| 1956 | 27.8 | 52 | 86 | 105 | 190.2 |
| 1957 | 23.2 | 38.8 | 45 | 48.8 | 62.6 |
| 1958 | 42.4 | 42.6 | 56 | 63.2 | 77.4 |

| | | | | | |
|------|------|------|------|-------|-------|
| 1959 | 25 | 32.8 | 46.6 | 74 | 116.2 |
| 1960 | 35.4 | 35.6 | 43.4 | 43.4 | 71.4 |
| 1961 | 42 | 47.8 | 77.2 | 112.2 | 123.2 |
| 1962 | 34.6 | 54.2 | 54.2 | 81 | 89.8 |
| 1963 | 35.6 | 38.6 | 39 | 54.8 | 65.2 |
| 1964 | 28.6 | 39 | 40.6 | 57.4 | 58.6 |
| 1965 | 29.2 | 29.4 | 33.4 | 48.4 | 74.4 |
| 1966 | 59 | 69.8 | 88.2 | 126.2 | 143.4 |
| 1967 | 18 | 24.8 | 33.8 | 56 | 71.4 |
| 1968 | 32.4 | 41.6 | 41.6 | 51.4 | 51.8 |
| 1969 | 45.4 | 48.2 | 48.2 | 53.4 | 53.6 |
| 1970 | 16.8 | 22 | 36.2 | 41.8 | 54.4 |
| 1971 | 33.6 | 34.2 | 34.2 | 47.58 | 66.6 |
| 1972 | 46 | 46 | 46.2 | 46.2 | 62.6 |
| 1973 | 25.6 | 39.6 | 39.6 | 40.8 | 52.6 |
| 1974 | 35.2 | 29.4 | 43.2 | 59 | 97.4 |
| 1975 | 27 | 28.6 | 34 | 35.8 | 37.8 |
| 1976 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1977 | 14.6 | 14.8 | 16 | 28 | 51 |
| 1978 | 32 | 39 | 44 | 44.4 | 50.4 |
| 1979 | 24 | 25.4 | 32 | 33.4 | 34.2 |
| 1980 | 29 | 32.8 | 34.6 | 34.6 | 34.6 |
| 1981 | 21.8 | 30.2 | 43.6 | 56.2 | 94.2 |
| 1982 | 32 | 33.6 | 42 | 52.4 | 71 |
| 1983 | 41 | 67.4 | 75.8 | 75.8 | 85 |
| 1984 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1985 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1986 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1987 | 37.4 | 39.8 | 47.4 | 56.4 | 80 |

| | | | | | |
|------|------|------|------|-------|-------|
| 1988 | 53.2 | 62.2 | 63.2 | 64.8 | 68.4 |
| 1989 | 29 | 31.6 | 33 | 38 | 48.6 |
| 1990 | 30.4 | 55 | 70 | 77 | 80.4 |
| 1991 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1992 | 15.2 | 24 | 38.6 | 65.4 | 86.2 |
| 1993 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1994 | 22.4 | 27.2 | 31.4 | 32.6 | 48.4 |
| 1995 | 32.6 | 51.6 | 73.6 | 81.6 | 81.6 |
| 1996 | 27 | 28 | 36 | 36 | 50.2 |
| 1997 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1998 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 1999 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 2000 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 2001 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 2002 | 32.6 | 52.2 | 61.6 | 74.4 | 79.2 |
| 2003 | 20.2 | 25.8 | 32.2 | 42.8 | 63 |
| 2004 | 39.8 | 58.2 | 66.6 | 67.4 | 71.4 |
| 2005 | 66.2 | 74.8 | 75 | 75.6 | 115.8 |
| 2006 | 34.6 | 50 | 74.8 | 97.6 | 111.6 |
| 2007 | 36.2 | 41.8 | 59.8 | 74.8 | 85.2 |
| 2008 | 26 | 35.4 | 48.8 | 65.4 | 74.6 |
| 2009 | 33.8 | 37.8 | 55.4 | 88.2 | 99.4 |
| 2010 | 20 | 31.4 | 37.8 | 54.4 | 69 |
| 2011 | 31.8 | 36 | 43.6 | 56.6 | 71.4 |
| 2012 | 47 | 62 | 68.2 | 93.6 | 101.2 |
| 2013 | 29.2 | 49.6 | 89.8 | 110.2 | 114.6 |
| 2014 | 75.6 | 88 | 90.2 | 92.6 | 102 |
| 2015 | 27.6 | 38.4 | 49.4 | 52.6 | 66.2 |
| 2016 | 30.6 | 34.6 | 38.8 | 55.8 | 66.6 |

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| 2017 | 28 | 35.4 | 43 | 50.4 | 51.6 |
| 2018 | 49.8 | 55 | 55.6 | 55.6 | 67.6 |
| 2019 | 42.2 | 43 | 46.6 | 57.6 | 74.8 |
| 2020 | 35 | 54.4 | 66.4 | 76 | 78.6 |
| 2021 | 33.2 | 67 | 82.2 | 87.8 | 88.6 |
| 2022 | 25.8 | 30.6 | 30.8 | 45.6 | 59 |
| 2023 | 36.4 | 52.6 | 53.2 | 58.6 | 75.6 |
| 2024 | 54.8 | 74.2 | 76.2 | 77 | 77.2 |

Tabella 2.3 Dati pluviometrici iniziale stazione Treviso

2.2 RICOSTRUZIONE DATI MANCANTI CON METODO IDW_m

Per migliorare l'affidabilità dell'analisi statistica è stato deciso di adottare una procedura per la ricostruzione dei dati mancanti basata sulle informazioni delle stazioni pluviometriche vicine. Questo è un procedimento molto importante dato che l'assenza di osservazioni potrebbe andare a compromettere ed alterare la determinazione dei parametri della distribuzione di probabilità utilizzata per l'analisi.

Per i metodi descritti di seguito si è fatto riferimento al documento [2].

Tra i possibili metodi per integrare le serie di pioggia vi sono le tecniche di interpolazione spaziale dei dati. Feng-Wen Chen et al. (2012) hanno analizzato diversi metodi, tra cui il metodo IDW, Inverse Distance Weighted, e il metodo IDW_m, Modified Inverse Distance Weighted.

Il metodo IDW standard stima il valore di un punto sconosciuto basandosi sui valori medi dei punti noti circostanti. Il peso di ciascun punto noto è inversamente proporzionale alla sua distanza dal punto da stimare, questo vuol dire che i dati delle stazioni pluviometriche vicine alla stazione di cui voglio integrare i dati avranno un'influenza maggiore di quelle più distanti.

Il metodo IDW_m, oltre ad assegnare i pesi ai punti noti in funzione della distanza dal punto da stimare, tiene conto anche della differenza di quota tra i punti. L'elevazione, infatti, influisce significativamente sulle quantità di precipitazione, per questo motivo, è stato scelto di adottare questo metodo rispetto alla sua versione standard.

L'equazione di tale metodo è:

$$P_p = \sum_{i=0}^N W_{pi} P_i = \sum_{i=0}^N (W_{dpi} \cdot W_{hpi}) \cdot P_i = \sum_{i=0}^N \frac{d_{pi}^{-m}}{\sum_{i=1}^N d_{pi}^{-m}} \cdot \frac{(|h|_{pi}^{-n})}{\sum_{i=1}^N |h|_{pi}^{-n}} \cdot P_i \quad (2.1)$$

Dove:

- P_p : dati di precipitazione stimati nella stazione pluviometrica target (mm);
- P_i : dati di precipitazione osservati delle stazioni pluviometriche note (mm);
- W_{pi} : peso totale di ogni stazione pluviometrica;
- W_{dpi} : peso relativo alla distanza orizzontale;
- W_{hpi} : peso relativo all'elevazione;
- N : numero di stazioni pluviometriche;
- d_{pi} : distanza tra la stazione pluviometrica con i dati osservati e la stazione target;
- $|h|$: differenza, in valore assoluto, dell'elevazione;
- m e n : esponenti relativi rispettivamente a distanza orizzontale ed elevazione.

Tale metodo è stato applicato mediante un codice scritto in Python [3], all'interno del quale sono stati inseriti tutti i dati di precipitazione di ogni durata per ogni stazione che stiamo considerando, comprese anche le loro coordinate geografiche (latitudine, longitudine e altitudine). Un aspetto molto importante è stata anche la scelta del raggio di ricerca, ovvero la massima distanza all'interno della quale le stazioni vengono considerate nel procedimento di interpolazione, in quanto l'impiego di un raggio troppo piccolo potrebbe comportare la considerazione di poche stazioni, mentre la scelta di un raggio troppo grande potrebbe comportare la considerazione di stazioni con condizioni di pioggia estremamente diverse. Al fine di fare la scelta più appropriata si è condotta un'analisi nella quale si sono andati a confrontare i risultati ottenuti dal codice per valori variabili del raggio, in particolare abbiamo considerato un valore d'inizio pari a 10 Km, fino ad arrivare ad un valore massimo di 120 Km con intervalli di 10 Km. Per ogni valore di raggio vengono confrontati i valori osservati (dati delle stazioni pluviometriche) con i valori simulati dal metodo, per poi andare a calcolare lo scarto quadratico medio e l'errore percentuale per ogni durata di ogni stazione. Confrontando infine i valori medi e tenendo in considerazione anche la disponibilità di dati, si è scelto di considerare come raggio ottimale 90 Km.

Nella *tabella 2.4* e *2.5* sono riassunti i calcoli eseguiti per la scelta del raggio:

| Scarto quadratico medio | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|--|--------------|-------|--|--------------|-------|
| 10km | | | 20km | | | 30km | |
| 24h | 13.57 | | 24h | 16.24 | | 24h | 15.99 |
| 12h | 11.42 | | 12h | 13.25 | | 12h | 12.85 |
| 6h | 9.15 | | 6h | 9.64 | | 6h | 9.52 |
| 3h | 8.15 | | 3h | 8.13 | | 3h | 7.94 |
| 1h | 6.26 | | 1h | 6.47 | | 1h | 6.21 |
| 9.71 | | | 10.75 | | | 10.50 | |
| 40km | | | 50km | | | 60km | |
| 24h | 16.53 | | 24h | 16.47 | | 24h | 16.18 |
| 12h | 13.18 | | 12h | 13.16 | | 12h | 12.93 |
| 6h | 9.72 | | 6h | 9.66 | | 6h | 9.54 |
| 3h | 7.93 | | 3h | 7.94 | | 3h | 7.88 |
| 1h | 6.02 | | 1h | 5.95 | | 1h | 5.93 |
| 10.67 | | | 10.64 | | | 10.49 | |
| 70km | | | 80km | | | 90 km | |
| 24h | 16.05 | | 24h | 15.79 | | 24h | 15.78 |
| 12h | 12.79 | | 12h | 12.61 | | 12h | 12.57 |
| 6h | 9.28 | | 6h | 9.16 | | 6h | 9.17 |
| 3h | 7.59 | | 3h | 7.54 | | 3h | 7.52 |
| 1h | 5.69 | | 1h | 5.70 | | 1h | 5.70 |
| 10.28 | | | 10.16 | | | 10.15 | |
| 100km | | | 110km | | | 120km | |
| 24h | 15.86 | | 24h | 15.92 | | 24h | 15.93 |
| 12h | 12.61 | | 12h | 12.65 | | 12h | 12.65 |
| 6h | 9.22 | | 6h | 9.25 | | 6h | 9.25 |
| 3h | 7.53 | | 3h | 7.54 | | 3h | 7.54 |
| 1h | 5.69 | | 1h | 5.67 | | 1h | 5.67 |
| 10.18 | | | 10.20 | | | 10.21 | |

Tabella 2.4 Scarto quadratico medio

| Errore percentuale % | | | | | | | |
|----------------------|-------|--|--------------|-------|--|--------------|-------|
| 10km | | | 20km | | | 30km | |
| 24h | 33.66 | | 24h | 33.65 | | 24h | 31.79 |
| 12h | 29.16 | | 12h | 29.38 | | 12h | 28.41 |
| 6h | 24.04 | | 6h | 26.48 | | 6h | 25.90 |
| 3h | 21.44 | | 3h | 27.70 | | 3h | 26.58 |
| 1h | 21.13 | | 1h | 25.94 | | 1h | 25.41 |
| 25.89 | | | 28.63 | | | 27.62 | |
| 40km | | | 50km | | | 60km | |
| 24h | 31.60 | | 24h | 31.37 | | 24h | 31.31 |
| 12h | 29.30 | | 12h | 29.35 | | 12h | 29.16 |
| 6h | 27.70 | | 6h | 27.34 | | 6h | 27.05 |
| 3h | 28.17 | | 3h | 28.02 | | 3h | 27.55 |
| 1h | 27.13 | | 1h | 26.89 | | 1h | 26.43 |
| 28.78 | | | 28.60 | | | 28.30 | |
| 70km | | | 80km | | | 90 km | |
| 24h | 30.45 | | 24h | 30.76 | | 24h | 30.77 |
| 12h | 28.39 | | 12h | 28.38 | | 12h | 28.33 |
| 6h | 26.66 | | 6h | 26.41 | | 6h | 26.47 |
| 3h | 27.69 | | 3h | 27.42 | | 3h | 27.35 |
| 1h | 26.43 | | 1h | 26.16 | | 1h | 26.18 |
| 27.92 | | | 27.83 | | | 27.82 | |
| 100km | | | 110km | | | 120km | |
| 24h | 30.75 | | 24h | 30.67 | | 24h | 30.68 |
| 12h | 28.41 | | 12h | 28.46 | | 12h | 28.45 |
| 6h | 26.67 | | 6h | 26.78 | | 6h | 26.77 |
| 3h | 27.49 | | 3h | 27.58 | | 3h | 27.58 |
| 1h | 26.32 | | 1h | 26.45 | | 1h | 26.45 |
| 27.93 | | | 27.99 | | | 27.99 | |

Tabella 2.5 Errore percentuale

In questo modo si è stati in grado di ottenere i dati di precipitazione completi, dai quali sarà possibile stimare nella miglior maniera possibile i parametri della distribuzione di probabilità GEV, necessari per la costruzione delle curve di possibilità pluviometrica.

Nella *tabella 2.6* si mostrano i dati di precipitazione completi ottenuti mediante il metodo IDWm della stazione pluviografica di Treviso.

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|-------|
| 1928 | 8 | 21 | 25 | 36 | 65 |
| 1929 | 29.6 | 31.1 | 38 | 60 | 82.4 |
| 1930 | 42.4 | 43.4 | 45.2 | 80 | 89 |
| 1931 | 26.2 | 36.3 | 42.1 | 54.3 | 68.1 |
| 1932 | 21.5 | 37.1 | 47.9 | 73.1 | 81.9 |
| 1933 | 39.1 | 59 | 74.8 | 81.8 | 89.1 |
| 1934 | 30.3 | 40 | 48.3 | 75.5 | 78.1 |
| 1935 | 25.3 | 34.7 | 42.1 | 62.9 | 91.4 |
| 1936 | 35.4 | 35.4 | 35.4 | 47 | 61.6 |
| 1937 | 25.7 | 35 | 46.5 | 71.4 | 116.8 |
| 1938 | 20.4 | 23.2 | 29.4 | 33 | 40.6 |
| 1939 | 40.8 | 47 | 71 | 118 | 118 |
| 1940 | 22 | 23.5 | 27 | 43 | 73 |
| 1941 | 21 | 26 | 33 | 64 | 77.2 |
| 1942 | 34.9 | 34.9 | 40.2 | 45.4 | 45.4 |
| 1943 | 25 | 32 | 35 | 39 | 54.4 |
| 1944 | 18 | 29.1 | 39.1 | 50.4 | 58.3 |
| 1945 | 19 | 24.8 | 27.7 | 42.7 | 45.1 |
| 1946 | 36.9 | 44 | 50.4 | 61 | 77.2 |
| 1947 | 39 | 39.2 | 50.5 | 104 | 125 |
| 1948 | 33 | 33.7 | 36.5 | 40 | 67.7 |
| 1949 | 36 | 48.3 | 49.3 | 51 | 82.5 |
| 1950 | 30.4 | 30.4 | 32 | 34 | 46.8 |
| 1951 | 29.8 | 33.2 | 35.8 | 52 | 68 |
| 1952 | 24.2 | 25 | 40 | 75.4 | 93.4 |
| 1953 | 29.8 | 47.6 | 52 | 73 | 118.8 |
| 1954 | 25 | 27 | 37.4 | 43.8 | 44 |
| 1955 | 25 | 38.2 | 39.4 | 48.6 | 60.6 |
| 1956 | 27.8 | 52 | 86 | 105 | 190.2 |

| | | | | | |
|------|------|------|------|-------|-------|
| 1957 | 23.2 | 38.8 | 45 | 48.8 | 62.6 |
| 1958 | 42.4 | 42.6 | 56 | 63.2 | 77.4 |
| 1959 | 25 | 32.8 | 46.6 | 74 | 116.2 |
| 1960 | 35.4 | 35.6 | 43.4 | 43.4 | 71.4 |
| 1961 | 42 | 47.8 | 77.2 | 112.2 | 123.2 |
| 1962 | 34.6 | 54.2 | 54.2 | 81 | 89.8 |
| 1963 | 35.6 | 38.6 | 39 | 54.8 | 65.2 |
| 1964 | 28.6 | 39 | 40.6 | 57.4 | 58.6 |
| 1965 | 29.2 | 29.4 | 33.4 | 48.4 | 74.4 |
| 1966 | 59 | 69.8 | 88.2 | 126.2 | 143.4 |
| 1967 | 18 | 24.8 | 33.8 | 56 | 71.4 |
| 1968 | 32.4 | 41.6 | 41.6 | 51.4 | 51.8 |
| 1969 | 45.4 | 48.2 | 48.2 | 53.4 | 53.6 |
| 1970 | 16.8 | 22 | 36.2 | 41.8 | 54.4 |
| 1971 | 33.6 | 34.2 | 34.2 | 47.6 | 66.6 |
| 1972 | 46 | 46 | 46.2 | 46.2 | 62.6 |
| 1973 | 25.6 | 39.6 | 39.6 | 40.8 | 52.6 |
| 1974 | 35.2 | 29.4 | 43.2 | 59 | 97.4 |
| 1975 | 27 | 28.6 | 34 | 35.8 | 37.8 |
| 1976 | 29.3 | 34.8 | 39.1 | 45.8 | 51.5 |
| 1977 | 14.6 | 14.8 | 16 | 28 | 51 |
| 1978 | 32 | 39 | 44 | 44.4 | 50.4 |
| 1979 | 24 | 25.4 | 32 | 33.4 | 34.2 |
| 1980 | 29 | 32.8 | 34.6 | 34.6 | 34.6 |
| 1981 | 21.8 | 30.2 | 43.6 | 56.2 | 94.2 |
| 1982 | 32 | 33.6 | 42 | 52.4 | 71 |
| 1983 | 41 | 67.4 | 75.8 | 75.8 | 85 |
| 1984 | 37.1 | 43.1 | 52.7 | 62 | 64.5 |
| 1985 | 18.8 | 22 | 30.7 | 51.7 | 72.2 |

| | | | | | |
|------|------|------|------|-------|-------|
| 1986 | 27.1 | 37.6 | 45.3 | 68.7 | 101.2 |
| 1987 | 37.4 | 39.8 | 47.4 | 56.4 | 80 |
| 1988 | 53.2 | 62.2 | 63.2 | 64.8 | 68.4 |
| 1989 | 29 | 31.6 | 33 | 38 | 48.6 |
| 1990 | 30.4 | 55 | 70 | 77 | 80.4 |
| 1991 | 32.5 | 46.9 | 51.9 | 60 | 78.4 |
| 1992 | 15.2 | 24 | 38.6 | 65.4 | 86.2 |
| 1993 | 28.6 | 32.2 | 37.4 | 39.6 | 50.7 |
| 1994 | 22.4 | 27.2 | 31.4 | 32.6 | 48.4 |
| 1995 | 32.6 | 51.6 | 73.6 | 81.6 | 81.6 |
| 1996 | 27 | 28 | 36 | 36 | 50.2 |
| 1997 | 24.8 | 28.7 | 34 | 45.4 | 56.9 |
| 1998 | 30 | 37.2 | 45.5 | 53.8 | 74 |
| 1999 | 26.5 | 37.7 | 48.9 | 59 | 63.5 |
| 2000 | 36.3 | 41.8 | 48.2 | 58.7 | 81.1 |
| 2001 | 30 | 40.4 | 50.2 | 63.1 | 69.4 |
| 2002 | 32.6 | 52.2 | 61.6 | 74.4 | 79.2 |
| 2003 | 20.2 | 25.8 | 32.2 | 42.8 | 63 |
| 2004 | 39.8 | 58.2 | 66.6 | 67.4 | 71.4 |
| 2005 | 66.2 | 74.8 | 75 | 75.6 | 115.8 |
| 2006 | 34.6 | 50 | 74.8 | 97.6 | 111.6 |
| 2007 | 36.2 | 41.8 | 59.8 | 74.8 | 85.2 |
| 2008 | 26 | 35.4 | 48.8 | 65.4 | 74.6 |
| 2009 | 33.8 | 37.8 | 55.4 | 88.2 | 99.4 |
| 2010 | 20 | 31.4 | 37.8 | 54.4 | 69 |
| 2011 | 31.8 | 36 | 43.6 | 56.6 | 71.4 |
| 2012 | 47 | 62 | 68.2 | 93.6 | 101.2 |
| 2013 | 29.2 | 49.6 | 89.8 | 110.2 | 114.6 |
| 2014 | 75.6 | 88 | 90.2 | 92.6 | 102 |

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| 2015 | 27.6 | 38.4 | 49.4 | 52.6 | 66.2 |
| 2016 | 30.6 | 34.6 | 38.8 | 55.8 | 66.6 |
| 2017 | 28 | 35.4 | 43 | 50.4 | 51.6 |
| 2018 | 49.8 | 55 | 55.6 | 55.6 | 67.6 |
| 2019 | 42.2 | 43 | 46.6 | 57.6 | 74.8 |
| 2020 | 35 | 54.4 | 66.4 | 76 | 78.6 |
| 2021 | 33.2 | 67 | 82.2 | 87.8 | 88.6 |
| 2022 | 25.8 | 30.6 | 30.8 | 45.6 | 59 |
| 2023 | 36.4 | 52.6 | 53.2 | 58.6 | 75.6 |
| 2024 | 54.8 | 74.2 | 76.2 | 77 | 77.2 |

Tabella 2.6 Dati pluviometrici completi stazione Treviso

3. ANALISI PRECIPITAZIONE ESTREME

3.1 NEVA

Si introduce ora il pacchetto software NEVA, Non-stationary Extreme Value Analysis, sviluppato da Linyin Cheng e Amir AghaKouchak [4] [5]. NEVA è stato progettato esplicitamente per facilitare l'analisi degli eventi estremi nelle geoscienze. Come spiegato dagli autori, Cheng et al. (2014), in un approccio bayesiano, NEVA stima i parametri di una distribuzione di probabilità dei valori estremi con un approccio DE-MC, Differential Evolution Markov Chain, per l'ottimizzazione globale dei parametri spaziali.

NEVA include intervalli di probabilità a posteriori (limiti di incertezza) dei livelli di ritorno stimati tramite inferenza bayesiana, con i suoi vantaggi intrinseci nella quantificazione dell'incertezza. Il software presenta i risultati dell'analisi non stazionaria dei valori estremi tramite diverse metodologie di valutazione della probabilità di superamento.

Nell'ipotesi di un clima stazionario, il concetto di tempo di ritorno fornisce informazioni cruciali per la progettazione, il processo decisionale e la valutazione degli impatti di eventi meteorologici e climatici. Il tempo di ritorno di T anni rappresenta un evento che ha la probabilità di verificarsi pari a $1/T$ in un dato anno, la progettazione delle infrastrutture si basa da tempo su altezze di pioggia ricavate con ipotesi stazionarie, che presuppongono l'invarianza della frequenza degli eventi estremi nel tempo. Tuttavia, la frequenza dei valori estremi è cambiata, ed è probabile che continui a cambiare in futuro. Pertanto, sono necessari concetti e modelli in grado di spiegare l'analisi non stazionaria degli estremi climatici e idrologici.

Nell'ipotesi di non stazionarietà, NEVA fornisce tre diversi metodi per la stima dei livelli di ritorno:

- Valori di ritorno standard (comunemente utilizzati nella progettazione) in cui la probabilità di non superamento è costante per qualsiasi tempo di ritorno durante la vita del progetto;
- Soglie costanti con probabilità di superamento variabile nel tempo;
- Valori di ritorno effettivi.

Una caratteristica unica di NEVA è che determina gli intervalli di probabilità a posteriori e i limiti di incertezza associati per le stime del livello di ritorno in condizioni di non stazionarietà. Queste caratteristiche rendono NEVA uno strumento pratico e interessante per gli utenti di diversi settori, in particolare climatologia e idrologia, per l'analisi degli estremi sia in base a ipotesi stazionarie che non stazionarie.

La funzione di distribuzione cumulata della GEV può essere espressa come:

$$\psi(x) = e^{-\left(1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right)^{\frac{-1}{\xi}}}, \left(1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right) > 0 \quad (3.1)$$

La quale dipende dai tre parametri:

- μ : parametro di posizione, che specifica il centro della distribuzione;
- σ : parametro di scala, determina l'entità delle deviazioni attorno al parametro di posizione;
- ξ : parametro di forma, governa il comportamento della coda della distribuzione GEV.

Nei casi limite:

- $\xi \rightarrow 0$, fornisce la distribuzione di Gumbel;
- $\xi < 0$, fornisce la distribuzione di Weibull;
- $\xi > 0$, fornisce la distribuzione di Fréchet.

Utilizzando la distribuzione GEV, NEVA calcola i tempi di ritorno e i valori degli estremi. In questo approccio, i valori di ritorno degli estremi sono espressi in funzione del periodo di ritorno T:

$$T = \frac{1}{1 - p} \quad (3.2)$$

Dove p è la probabilità di non superamento per un dato anno, assunta costante sotto stazionarietà.

Il valore di ritorno q_p , derivato dalla distribuzione GEV, può essere espresso come:

$$q_p = \left(\left(-\frac{1}{\ln p} \right)^\xi - 1 \right) \frac{\sigma}{\xi} + \tilde{\mu}, \quad (\xi \neq 0) \quad (3.3)$$

Nella GEV stazionaria i parametri della distribuzione sono costanti, mentre nella distribuzione non stazionaria i parametri possono variare nel tempo; nel caso qui esaminato si è ipotizzato che solo il parametro di posizione varia linearmente nel tempo:

$$\mu(t) = \mu_1 t + \mu_0 \quad (3.4)$$

La GEV non stazionaria sarà quindi funzione di 4 parametri: $\mu_1, \mu_0, \xi, \sigma$.

Nella GEV stazionaria, il parametro di posizione μ è costante e, nel caso non stazionario tale parametro sarà variabile nel tempo e calcolato con la precedente espressione. La sua valutazione può essere effettuata attraverso due metodi diversi:

- Metodo A: il parametro è calcolato come mediana di $\mu(t)$, che si riferisce al livello di rendimento effettivo per l'anno corrispondente al punto medio della serie temporale;
- Metodo B: calcolato come 95° percentile dei valori campionati.

La presenza di trend viene valutata tramite il test di Mann-Kendall, implementato nel software con livello di significatività impostato dall'utente, il valore predefinito è $\alpha = 0,05$. Se il test rileva un trend significativo, NEVA effettua automaticamente l'analisi non stazionaria, in caso contrario applica il modello stazionario.

Il test di Mann-Kendall è un test statistico non parametrico usato per verificare se in una serie temporale esiste una tendenza monotona, crescente o decrescente, senza richiedere alcuna assunzione sulla distribuzione dei dati. Per applicarlo si calcola la statistica S, ottenuta valutando, per ogni coppia di osservazioni (x_j, x_k) con $j > k$:

$$sign(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & x_j > x_k \\ 0 & x_j = x_k \\ -1 & x_j < x_k \end{cases} \quad (3.5)$$

La statistica S è data da:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n sign(x_j - x_k) \quad (3.6)$$

Dove n è il numero delle osservazioni.

Per valori sufficientemente grandi di n, tipicamente $n > 10$, S viene trasformata nella statistica Z:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Con:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3.8)$$

Il test verifica se rifiutare l'ipotesi nulla (H_0), che assume assenza di trend monotono, a favore dell'ipotesi alternativa (H_a), che prevede la presenza di un trend. La statistica $|Z|$ viene confrontata con il valore critico $Z_{\alpha/2}$, determinato dal livello di significatività α . L'ipotesi nulla viene rifiutata se la statistica $|Z|$ è maggiore del valore critico $Z_{\alpha/2}$, quindi se l'ipotesi nulla non viene rifiutata, NEVA eseguirà l'analisi dei valori estremi sotto ipotesi stazionarie, viceversa, in caso di trend stimerà i parametri sotto ipotesi non stazionarie.

Come detto in precedenza, il programma utilizza una tecnica bayesiana per stimare i parametri della distribuzione GEV, in condizioni stazionarie e non stazionarie, e genera un gran numero di valori della distribuzione a posteriori congiunta dei parametri utilizzando la Differential Evolution Markov Chain (DE-MC).

3.2 DATI DI INPUT DI NEVA

Come spiegato nel manuale utente di NEVA (fonte: *NEVA_user_guide, 2014, Linying Cheng, Amir Aghakouchak*), il software analizza i dati di input, archiviati in file di testo, presenti in un'apposita cartella da cui vengono estratti. I file raccolgono tutte le informazioni necessarie all'applicazione della distribuzione GEV, tra cui le serie storiche, i parametri della distribuzione e i nomi da assegnare ai grafici che il programma restituisce come output.

Nel dettaglio, i file di input sono:

- “GEV_sta_nonsta”: include i parametri del modello;
- “names”: contiene i nomi delle stazioni e i titoli degli assi dei grafici;
- “prior”: definisce la distribuzione di probabilità “a priori”, e i limiti della stessa;

- “si1”: registra i dati delle serie storiche di tutte le stazioni in input.

Entrando più nel dettaglio della composizione dei file:

Il file “GEV_sta_nonsta” contiene i dati di:

- da: fine anno delle osservazioni;
- evl: numero di campioni casuali per la stima dei parametri;
- bur: numero di campioni scartati;
- cha: chain number;
- sts: sotto campionamento;
- siteNO: numero di siti/misuratori;
- Nonsta:
 - 0: simulazione stazionaria;
 - 1: non stazionarietà del parametro di posizione;
 - 2: non stazionarietà dei parametri di posizione e scala.
- tt: tempo di ritorno;
- done: notifica via e-mail quando la simulazione è completa:
 - 0: no;
 - altrimenti: Sì.
- plottrend: plottare le linee di trend:
 - 0: No;
 - altrimenti: Sì.
- GEVQQ: generare grafici QQ per valutare se i dati si adattano a GEV:
 - 0: No;
 - altrimenti: Sì.
- wait: simulazione basata sulla teoria del tempo di attesa
- lir: test del rapporto di verosimiglianza:
 - 0: No;
 - altrimenti: Sì.
- BF: calcolo del valore di bayes:

- 0: No;
- altrimenti: Sì
- Quic:
- Quic=0 stima dei parametri basata sul metodo DEMC;
- Quic=1 stima dei parametri basata sul metodo della massima verosimiglianza;
- Quic=2 stima dei parametri basata sia sul metodo della massima verosimiglianza che sul metodo DEMC.
- Wtrend:
- 0: la simulazione non stazionaria verrà eseguita solo se esiste una tendenza statistica significativa;
- 1: la simulazione non stazionaria verrà eseguita indipendentemente dalla significatività della tendenza.

Nella *figura 3.1* è riportata l'impostazione del file di testo appena descritto.

| | |
|-----------|------|
| da | 2024 |
| evl | 3000 |
| bur | 2000 |
| cha | 5 |
| sts | 1 |
| siteNO | 5 |
| Nonsta | 0 |
| tt | 100 |
| done | 0 |
| plottrend | 0 |
| GEVQQ | 0 |
| effec | 1 |
| CI | 0 |
| cov | 0 |
| waitT | 0 |
| lir | 0 |
| BF | 0 |
| quic | 0 |
| wtrend | 0 |

Figura 3.1 File di testo GEV_sta_nonsta

Il file “names” definisce i titoli e le etichette nelle figure di output:

- Prima riga: contiene i titoli delle figure di output per il modello stazionario;
- Seconda riga: contiene i titoli delle figure di output per il modello non stazionario;
- Terza riga: nome dell’asse x del grafico;
- Quarta riga: nome dell’asse y del grafico;

Il file “prior” contiene l’intervallo dei parametri dei modelli:

- Sigma: intervallo del parametro di scala della distribuzione GEV;
- K: intervallo del parametro di forma della distribuzione GEV;
- Alpha: intervallo della pendenza per il parametro di posizione in condizioni non stazionarie;
- Beta: intervallo dell’intercetta per il parametro di posizione in condizioni non stazionarie;
- Asig: intervallo della pendenza per il parametro di scala in condizioni non stazionarie;
- Bsig: intervallo dell’intercetta per il parametro di scala in condizioni non stazionarie

Nella *figura 3.2* è riportata l’impostazione del file di testo appena descritto.

```
SIGMA  0  100
K      0  0.3
Apha   0  100
Beta   0  100
Asig   0  10
Bsig   -100  100
```

Figura 3.2 File di testo prior

Il file “s1” contiene i dati di input:

- Ultima colonna contiene gli anni delle serie storiche;
- Tutte le altre colonne contengono i dati dei massimi delle serie storiche.

Nella *figura 3.3* è riportato il file di testo appena descritto, contenente ad esempio i dati della stazione di Treviso.

| | | | | | |
|------|------|------|-------|-------|------|
| 8.0 | 21.0 | 25.0 | 36.0 | 65.0 | 1928 |
| 29.6 | 31.1 | 38.0 | 60.0 | 82.4 | 1929 |
| 42.4 | 43.4 | 45.2 | 80.0 | 89.0 | 1930 |
| 26.2 | 36.3 | 42.1 | 54.3 | 68.1 | 1931 |
| 21.5 | 37.1 | 47.9 | 73.1 | 81.9 | 1932 |
| 39.1 | 59.0 | 74.8 | 81.8 | 89.1 | 1933 |
| 30.3 | 40.0 | 48.3 | 75.5 | 78.1 | 1934 |
| 25.3 | 34.7 | 42.1 | 62.9 | 91.4 | 1935 |
| 35.4 | 35.4 | 35.4 | 47.0 | 61.6 | 1936 |
| 25.7 | 35.0 | 46.5 | 71.4 | 116.8 | 1937 |
| 20.4 | 23.2 | 29.4 | 33.0 | 40.6 | 1938 |
| 40.8 | 47.0 | 71.0 | 118.0 | 118.0 | 1939 |
| 22.0 | 23.5 | 27.0 | 43.0 | 73.0 | 1940 |
| 21.0 | 26.0 | 33.0 | 64.0 | 77.2 | 1941 |
| 34.9 | 34.9 | 40.2 | 45.4 | 45.4 | 1942 |
| 25.0 | 32.0 | 35.0 | 39.0 | 54.4 | 1943 |
| 18.0 | 29.1 | 39.1 | 50.4 | 58.3 | 1944 |
| 19.0 | 24.8 | 27.7 | 42.7 | 45.1 | 1945 |
| 36.9 | 44.0 | 50.4 | 61.0 | 77.2 | 1946 |
| 39.0 | 39.2 | 50.5 | 104.0 | 125.0 | 1947 |
| 33.0 | 33.7 | 36.5 | 40.0 | 67.7 | 1948 |
| 36.0 | 48.3 | 49.3 | 51.0 | 82.5 | 1949 |
| 30.4 | 30.4 | 32.0 | 34.0 | 46.8 | 1950 |
| 29.8 | 33.2 | 35.8 | 52.0 | 68.0 | 1951 |
| 24.2 | 25.0 | 40.0 | 75.4 | 93.4 | 1952 |
| 29.8 | 47.6 | 52.0 | 73.0 | 118.8 | 1953 |
| 25.0 | 27.0 | 37.4 | 43.8 | 44.0 | 1954 |
| 25.0 | 38.2 | 39.4 | 48.6 | 60.6 | 1955 |
| 27.8 | 52.0 | 86.0 | 105.0 | 190.2 | 1956 |
| 23.2 | 38.8 | 45.0 | 48.8 | 62.6 | 1957 |
| 42.4 | 42.6 | 56.0 | 63.2 | 77.4 | 1958 |
| 25.0 | 32.8 | 46.6 | 74.0 | 116.2 | 1959 |
| 35.4 | 35.6 | 43.4 | 43.4 | 71.4 | 1960 |
| 42.0 | 47.8 | 77.2 | 112.2 | 123.2 | 1961 |
| 34.6 | 54.2 | 54.2 | 81.0 | 89.8 | 1962 |
| 35.6 | 38.6 | 39.0 | 54.8 | 65.2 | 1963 |
| 28.6 | 39.0 | 40.6 | 57.4 | 58.6 | 1964 |
| 29.2 | 29.4 | 33.4 | 48.4 | 74.4 | 1965 |
| 59.0 | 69.8 | 88.2 | 126.2 | 143.4 | 1966 |
| 18.0 | 24.8 | 33.8 | 56.0 | 71.4 | 1967 |
| 32.4 | 41.6 | 41.6 | 51.4 | 51.8 | 1968 |
| 45.4 | 48.2 | 48.2 | 53.4 | 53.6 | 1969 |
| 16.8 | 22.0 | 36.2 | 41.8 | 54.4 | 1970 |
| 33.6 | 34.2 | 34.2 | 47.6 | 66.6 | 1971 |
| 46.0 | 46.0 | 46.2 | 46.2 | 62.6 | 1972 |
| 25.6 | 39.6 | 39.6 | 40.8 | 52.6 | 1973 |
| 35.2 | 29.4 | 43.2 | 59.0 | 97.4 | 1974 |
| 27.0 | 28.6 | 34.0 | 35.8 | 37.8 | 1975 |
| 29.3 | 34.8 | 39.1 | 45.8 | 51.5 | 1976 |
| 14.6 | 14.8 | 16.0 | 28.0 | 51.0 | 1977 |
| 32.0 | 39.0 | 44.0 | 44.4 | 50.4 | 1978 |
| 24.0 | 25.4 | 32.0 | 33.4 | 34.2 | 1979 |
| 29.0 | 32.8 | 34.6 | 34.6 | 34.6 | 1980 |
| 21.8 | 30.2 | 43.6 | 56.2 | 94.2 | 1981 |
| 32.0 | 33.6 | 42.0 | 52.4 | 71.0 | 1982 |
| 41.0 | 67.4 | 75.8 | 75.8 | 85.0 | 1983 |
| 37.1 | 43.1 | 52.7 | 62.0 | 64.5 | 1984 |
| 18.8 | 22.0 | 30.7 | 51.7 | 72.2 | 1985 |

| | | | | | |
|------|------|------|-------|-------|------|
| 27.1 | 37.6 | 45.3 | 68.7 | 101.2 | 1986 |
| 37.4 | 39.8 | 47.4 | 56.4 | 80.0 | 1987 |
| 53.2 | 62.2 | 63.2 | 64.8 | 68.4 | 1988 |
| 29.0 | 31.6 | 33.0 | 38.0 | 48.6 | 1989 |
| 30.4 | 55.0 | 70.0 | 77.0 | 80.4 | 1990 |
| 32.5 | 46.9 | 51.9 | 60.0 | 78.4 | 1991 |
| 15.2 | 24.0 | 38.6 | 65.4 | 86.2 | 1992 |
| 28.6 | 32.2 | 37.4 | 39.6 | 50.7 | 1993 |
| 22.4 | 27.2 | 31.4 | 32.6 | 48.4 | 1994 |
| 32.6 | 51.6 | 73.6 | 81.6 | 81.6 | 1995 |
| 27.0 | 28.0 | 36.0 | 36.0 | 50.2 | 1996 |
| 24.8 | 28.7 | 34.0 | 45.4 | 56.9 | 1997 |
| 30.0 | 37.2 | 45.5 | 53.8 | 74.0 | 1998 |
| 26.5 | 37.7 | 48.9 | 59.0 | 63.5 | 1999 |
| 36.3 | 41.8 | 48.2 | 58.7 | 81.1 | 2000 |
| 30.0 | 40.4 | 50.2 | 63.1 | 69.4 | 2001 |
| 32.6 | 52.2 | 61.6 | 74.4 | 79.2 | 2002 |
| 20.2 | 25.8 | 32.2 | 42.8 | 63.0 | 2003 |
| 39.8 | 58.2 | 66.6 | 67.4 | 71.4 | 2004 |
| 66.2 | 74.8 | 75.0 | 75.6 | 115.8 | 2005 |
| 34.6 | 50.0 | 74.8 | 97.6 | 111.6 | 2006 |
| 36.2 | 41.8 | 59.8 | 74.8 | 85.2 | 2007 |
| 26.0 | 35.4 | 48.8 | 65.4 | 74.6 | 2008 |
| 33.8 | 37.8 | 55.4 | 88.2 | 99.4 | 2009 |
| 20.0 | 31.4 | 37.8 | 54.4 | 69.0 | 2010 |
| 31.8 | 36.0 | 43.6 | 56.6 | 71.4 | 2011 |
| 47.0 | 62.0 | 68.2 | 93.6 | 101.2 | 2012 |
| 29.2 | 49.6 | 89.8 | 110.2 | 114.6 | 2013 |
| 75.6 | 88.0 | 90.2 | 92.6 | 102.0 | 2014 |
| 27.6 | 38.4 | 49.4 | 52.6 | 66.2 | 2015 |
| 30.6 | 34.6 | 38.8 | 55.8 | 66.6 | 2016 |
| 28.0 | 35.4 | 43.0 | 50.4 | 51.6 | 2017 |
| 49.8 | 55.0 | 55.6 | 55.6 | 67.6 | 2018 |
| 42.2 | 43.0 | 46.6 | 57.6 | 74.8 | 2019 |
| 35.0 | 54.4 | 66.4 | 76.0 | 78.6 | 2020 |
| 33.2 | 67.0 | 82.2 | 87.8 | 88.6 | 2021 |
| 25.8 | 30.6 | 30.8 | 45.6 | 59.0 | 2022 |
| 36.4 | 52.6 | 53.2 | 58.6 | 75.6 | 2023 |
| 54.8 | 74.2 | 76.2 | 77.0 | 77.2 | 2024 |

Figura 3.3 File di testo si1

Oltre a questi file, contenenti i dati di input, è anche possibile modificare il valore del parametro α per il test di Mann-Kendall integrato nel programma, tale parametro è contenuto nella funzione “trendpa”.

Per semplificare l’esecuzione delle analisi, il programma è stato modificato. La versione originale, infatti, presentava un limite nel numero di serie analizzabili, non riusciva a elaborare più di 5 serie, anche inserendone di più, analizzando sempre solo le prime 5. Nella versione modificata, invece, è possibile eseguire l’analisi su qualsiasi numero di serie di dati

3.3 FILE DI OUTPUT DI NEVA

Neva restituisce in output due tipi di file:

- `smp1.mat`: contiene i valori dei parametri μ , σ e ξ generati dall'analisi stazionaria della distribuzione GEV, i parametri sono organizzati in colonne con numero di righe pari al numero di "evl" scelto nel file "GEV_sta_nonsta";
- `nonsmp1.mat`: contiene i valori dei parametri μ_0 , μ_1 , σ e ξ generati dall'analisi non stazionaria della distribuzione GEV, i parametri sono organizzati nello stesso modo del precedente file.

Oltre ai precedenti file, per l'analisi stazionaria, il programma genera per ogni serie di input un grafico, nel quale viene rappresentato sull'asse delle ascisse il tempo di ritorno in anni e sull'asse delle ordinate l'altezza di precipitazione in mm.

Nella *figura 3.4* è possibile vedere il grafico associato alla serie di durata 1 ora per la stazione di Treviso.

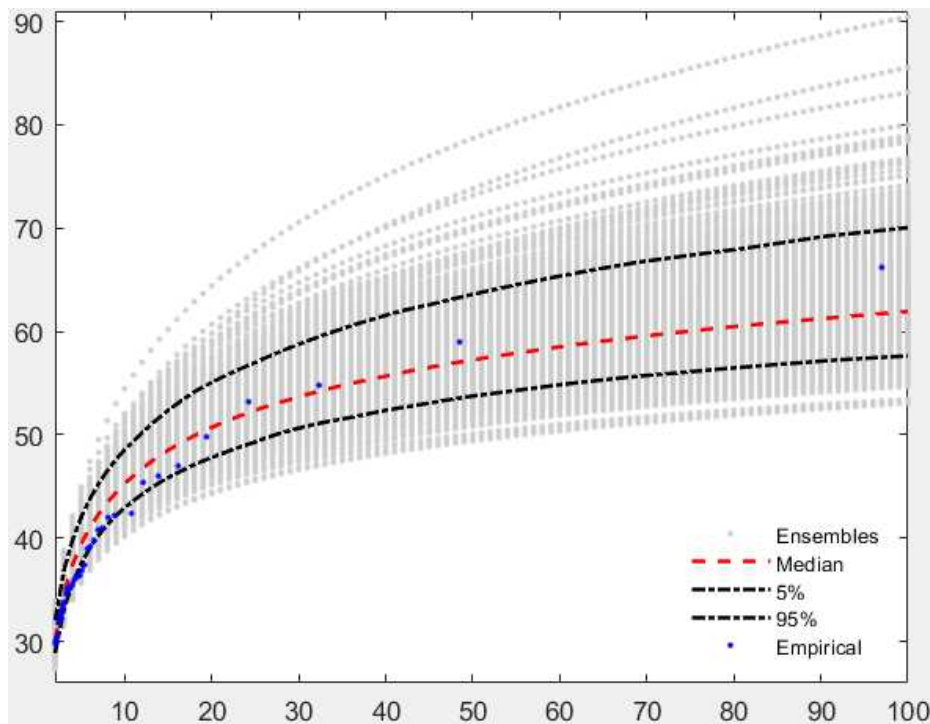


Figura 3.4 Distribuzione GEV stazionari stazione Treviso durata 1 ora

Nel grafico sono rappresentati:

- punti blu corrispondono ai valori della serie campionata analizzata;
- punti grigi corrispondono ai valori calcolati dal modello in funzione del tempo di ritorno;
- linea rossa: mediana dei valori calcolati dal modello;
- linea nera superiore: linea che rappresenta il 95% dei valori calcolati dal modello;
- linea nera inferiore: linea che rappresenta il 5% dei valori calcolati dal modello.

Per l'analisi non stazionaria, invece, genera due grafici per serie, che sono riportati nella *figura 3.5* e nella *figura 3.6*:

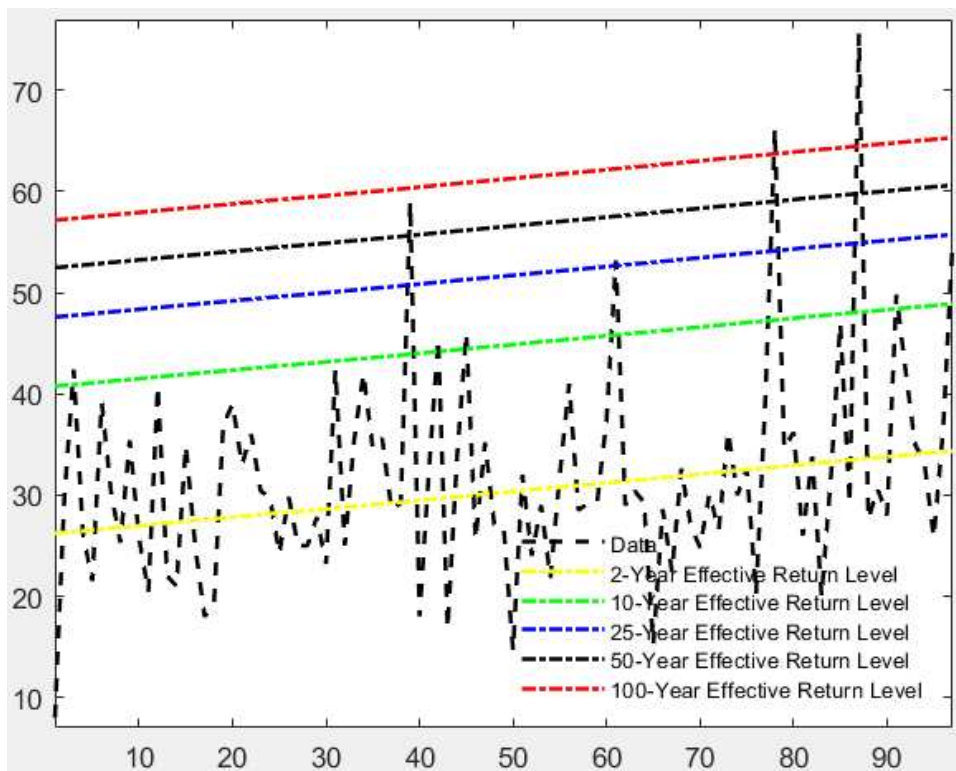


Figura 3.5 Serie storica stazione Treviso durata 1 ora

- 1 In questo grafico, viene rappresentato sull'asse delle ascisse il tempo di ritorno in anni, con il numero di anni corrispondente a quello della serie campionata, e sull'asse delle ordinate il valore dell'altezza di pioggia della serie, ordinato cronologicamente come serie di punti. Vengono inoltre rappresentate le curve dei tempi di ritorno effettivi, che esprimono l'altezza di precipitazione per i tempi di ritorno di 2, 10, 25, 50 e 100 anni, in condizioni di non stazionarietà. Queste curve sono utili per comprendere il trend della serie storica risultante dal test di Mann-Kendall, che può mostrare un andamento crescente o decrescente. Questa rappresentazione evidenzia il comportamento delle precipitazioni nel corso del tempo.

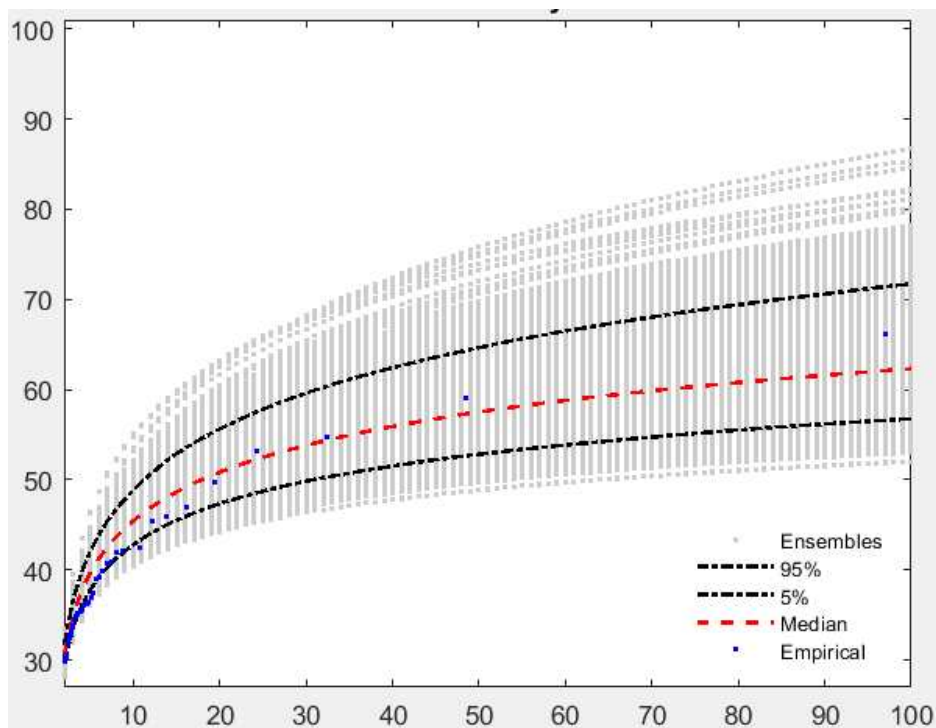


Figura 3.6 Distribuzione GEV non stazionaria stazione Treviso durata 1 ora

- 2 Nel grafico riportato, il software genera delle curve rappresentanti i valori di altezza di pioggia al variare del tempo di ritorno. Viene rappresentato sull'asse delle ascisse il tempo di ritorno, e su quello delle ordinate l'altezza di precipitazione.

- punti blu: corrispondono ai valori della serie campionata analizzata;
- punti grigi: corrispondono ai valori calcolati dal modello in funzione del tempo di ritorno;
- linea rossa: mediana dei valori calcolati dal modello;
- linea nera superiore: linea che rappresenta il 95% dei valori calcolati dal modello;
- linea nera inferiore: linea che rappresenta il 5% dei valori calcolati dal modello.

3.4 ANALISI DEL TREND

L'analisi del trend costituisce un aspetto fondamentale per capire al meglio le caratteristiche degli eventi di precipitazione estremi, in particolar modo se possono essere considerate stazionarie o non stazionarie, qual ora presentassero variazioni significative nel tempo. La presenza di trend può indicare una possibile evoluzione negli eventi che stiamo considerando, con conseguenze molto importanti per quanto riguarda la progettazione di infrastrutture idrauliche.

La seguente analisi è stata condotta mediante l'applicazione del test di Mann-Kendall, descritto nel capitolo precedente, considerando diversi livelli di significatività α . Si sono considerati livelli pari a 0.05, 0.1, 0.2 e 0.3, rispettivamente nelle tabelle: 3.1, 3.2, 3.3, 3.4.

Le tabelle mostrano i risultati ottenuti. In particolare:

- *Tabella 3.1* ($\alpha = 0.05$): si sono riscontrate solo 8 stazioni sulle 31 considerate (evidenziate in giallo) che mostrano trend per tutte le durate di precipitazione considerate, mentre per la maggior parte delle altre stazioni non è stato riscontrato trend per nessuna delle durate, o al massimo solo per alcune di esse;

- *Tabella 3.2* ($\alpha = 0.1$): anche in questo caso, come per il caso precedente, si sono riscontrate solo 8 stazioni che mostrano trend per tutte le durate considerate;
- *Tabella 3.3* ($\alpha = 0.2$): in questo caso invece, si è riscontrato un numero decisamente maggiore di stazioni con trend completo, ovvero 16, il doppio dei due casi precedenti. Inoltre, è passato a 0 il numero di stazioni che non hanno trend per nessuna delle durate considerate;
- *Tabella 3.4* ($\alpha = 0.3$): in questo ultimo caso invece, sono solo 8 le stazioni a non presentare trend completo. Nonostante ciò, ciascuna di esse presenta trend per almeno due o più delle durate considerate.

| $\alpha = 0,05$ | Durata [h] | | | | |
|-----------------------------|------------|----|----|-----|-----|
| | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| Stazione | | | | | |
| V001Conegliano | NO | NO | NO | NO | NO |
| V002Sappada | NO | NO | NO | NO | NO |
| V003Santo Stefano di Cadore | NO | NO | NO | NO | SI |
| V004Auronzo | NO | NO | NO | NO | SI |
| V005Cortina d'Ampezzo | SI | SI | SI | NO | SI |
| V006Perarolo di Cadore | NO | NO | NO | NO | NO |
| V007Longarone | NO | NO | NO | NO | NO |
| V008Forno di Zoldo | NO | NO | NO | NO | NO |
| V012Belluno | NO | NO | NO | NO | NO |
| V013Sant'Antonio di Tortal | NO | NO | NO | NO | NO |
| V014Arabba | SI | SI | SI | SI | SI |
| V015Caprile | SI | SI | SI | SI | SI |
| V016Agordo | NO | NO | SI | NO | NO |
| V017Gosaldo | NO | NO | NO | NO | NO |
| V018Feltre | SI | NO | NO | NO | NO |
| V019Valdobbiadene | NO | NO | NO | NO | NO |
| V021Portogruaro | SI | SI | SI | SI | SI |
| V031Bassano del Grappa | NO | NO | NO | NO | NO |
| V034Villorba | SI | SI | NO | SI | SI |
| V035Treviso | NO | NO | NO | SI | SI |
| V040Cittadella | NO | NO | NO | SI | SI |
| V047Chioggia | NO | SI | SI | SI | SI |
| V049Asiago | NO | NO | NO | NO | NO |
| V050Posina | NO | NO | NO | NO | NO |
| V052Valli del Pasubio | NO | NO | NO | NO | NO |
| V054Vicenza | SI | SI | SI | NO | NO |
| V059Chiampo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V060Padova | NO | NO | SI | SI | SI |
| V074Rovigo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V075Adria | SI | SI | SI | SI | SI |

Tabella 3.1 Trend livello significatività 0.05

| $\alpha = 0,1$ | Durata [h] | | | | |
|-----------------------------|------------|----|----|-----|-----|
| | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| Stazione | | | | | |
| V001Conegliano | NO | NO | NO | NO | SI |
| V002Sappada | SI | NO | NO | NO | NO |
| V003Santo Stefano di Cadore | SI | NO | NO | NO | SI |
| V004Auronzo | NO | NO | NO | NO | SI |
| V005Cortina d'Ampezzo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V006Perarolo di Cadore | NO | NO | NO | NO | NO |
| V007Longarone | NO | NO | NO | NO | NO |
| V008Forno di Zoldo | NO | NO | NO | NO | NO |
| V012Belluno | NO | NO | NO | NO | NO |
| V013Sant'Antonio di Tortal | NO | NO | NO | NO | NO |
| V014Arabba | SI | SI | SI | SI | SI |
| V015Caprile | SI | SI | SI | SI | SI |
| V016Agordo | SI | NO | SI | NO | NO |
| V017Gosaldo | NO | NO | NO | NO | NO |
| V018Feltre | SI | NO | NO | NO | NO |
| V019Valdobbiadene | SI | NO | NO | NO | NO |
| V021Portogruaro | SI | SI | SI | SI | SI |
| V031Bassano del Grappa | NO | NO | NO | NO | NO |
| V034Villorba | SI | SI | NO | SI | SI |
| V035Treviso | SI | NO | NO | SI | SI |
| V040Cittadella | NO | SI | NO | SI | SI |
| V047Chioggia | NO | SI | SI | SI | SI |
| V049Asiago | SI | NO | NO | NO | NO |
| V050Posina | NO | NO | NO | NO | NO |
| V052Valli del Pasubio | NO | NO | NO | NO | NO |
| V054Vicenza | SI | SI | SI | SI | NO |
| V059Chiampo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V060Padova | NO | SI | SI | SI | SI |
| V074Rovigo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V075Adria | SI | SI | SI | SI | SI |

Tabella 3.2 Trend livello significatività 0.1

| $\alpha = 0,2$ | Durata [h] | | | | |
|-----------------------------|------------|----|----|-----|-----|
| | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| Stazione | | | | | |
| V001Conegliano | SI | SI | NO | SI | SI |
| V002Sappada | SI | SI | NO | NO | NO |
| V003Santo Stefano di Cadore | SI | SI | SI | NO | SI |
| V004Auronzo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V005Cortina d'Ampezzo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V006Perarolo di Cadore | SI | SI | NO | NO | NO |
| V007Longarone | SI | SI | NO | NO | NO |
| V008Forno di Zoldo | SI | SI | SI | NO | NO |
| V012Belluno | SI | SI | SI | SI | NO |
| V013Sant'Antonio di Tortal | SI | NO | NO | NO | NO |
| V014Arabba | SI | SI | SI | SI | SI |
| V015Caprile | SI | SI | SI | SI | SI |
| V016Agordo | SI | SI | SI | NO | NO |
| V017Gosaldo | SI | NO | NO | NO | NO |
| V018Feltre | SI | NO | NO | NO | NO |
| V019Valdobbiadene | SI | SI | SI | NO | NO |
| V021Portogruaro | SI | SI | SI | SI | SI |
| V031Bassano del Grappa | SI | SI | SI | SI | SI |
| V034Villorba | SI | SI | SI | SI | SI |
| V035Treviso | SI | SI | SI | SI | SI |
| V040Cittadella | SI | SI | SI | SI | SI |
| V047Chioggia | SI | SI | SI | SI | SI |
| V049Asiago | SI | SI | NO | NO | NO |
| V050Posina | SI | NO | NO | NO | NO |
| V052Valli del Pasubio | SI | SI | NO | NO | NO |
| V054Vicenza | SI | SI | SI | SI | SI |
| V059Chiampo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V060Padova | SI | SI | SI | SI | SI |
| V074Rovigo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V075Adria | SI | SI | SI | SI | SI |

Tabella 3.3 Trend livello significatività 0.2

| $\alpha = 0,3$ | Durata [h] | | | | |
|-----------------------------|------------|----|----|-----|-----|
| | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| Stazione | | | | | |
| V001Conegliano | SI | SI | SI | SI | SI |
| V002Sappada | SI | SI | SI | NO | NO |
| V003Santo Stefano di Cadore | SI | SI | SI | SI | SI |
| V004Auronzo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V005Cortina d'Ampezzo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V006Perarolo di Cadore | SI | SI | SI | SI | NO |
| V007Longarone | SI | SI | SI | SI | NO |
| V008Forno di Zoldo | SI | SI | SI | SI | NO |
| V012Belluno | SI | SI | SI | SI | SI |
| V013Sant'Antonio di Tortal | SI | SI | NO | NO | NO |
| V014Arabba | SI | SI | SI | SI | SI |
| V015Caprile | SI | SI | SI | SI | SI |
| V016Agordo | SI | SI | SI | NO | NO |
| V017Gosaldo | SI | SI | NO | NO | NO |
| V018Feltre | SI | SI | NO | NO | NO |
| V019Valdobbiadene | SI | SI | SI | SI | SI |
| V021Portogruaro | SI | SI | SI | SI | SI |
| V031Bassano del Grappa | SI | SI | SI | SI | SI |
| V034Villorba | SI | SI | SI | SI | SI |
| V035Treviso | SI | SI | SI | SI | SI |
| V040Cittadella | SI | SI | SI | SI | SI |
| V047Chioggia | SI | SI | SI | SI | SI |
| V049Asiago | SI | SI | SI | SI | SI |
| V050Posina | SI | SI | NO | NO | NO |
| V052Valli del Pasubio | SI | SI | SI | SI | NO |
| V054Vicenza | SI | SI | SI | SI | SI |
| V059Chiampo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V060Padova | SI | SI | SI | SI | SI |
| V074Rovigo | SI | SI | SI | SI | SI |
| V075Adria | SI | SI | SI | SI | SI |

Tabella 3.4 Trend livello significatività 0.3

Sulla base dei risultati ottenuti si è scelto di focalizzare l'attenzione sulle stazioni che hanno mostrato trend per tutte le durate di riferimento con livello di significatività alpha pari a 0.2. Per quest'ultime, nel capitolo successivo, si è proceduto a calcolare le curve di possibilità pluviometrica a partire dai parametri della distribuzione GEV forniti dal codice NEVA.

4. COSTRUZIONE CURVE DI POSSIBILITA' PLUVIOMETRICA

Le curve di possibilità pluviometrica (CPP) sono da diverso tempo l'elemento fondamentale per determinare l'input in un modello di trasformazione afflussi-deflussi nel calcolo degli idrogrammi di portata e del loro picco, per la progettazione di opere idrauliche. Le curve rappresentano la relazione tra l'altezza di precipitazione e la durata dell'evento per un prefissato tempo di ritorno. Quest'ultimo è definito come una grandezza statistica che indica il tempo medio intercorrente tra due eventi successivi di una determinata intensità. Nell'analisi si sono considerati tempi di ritorno uguali a 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anni.

Nella seguente analisi le curve sono state determinate a partire dai parametri della distribuzione di probabilità GEV restituiti dal codice NEVA per ogni durata di precipitazione considerata per ogni stazione. In particolare, per la determinazione dell'altezza di precipitazione si sono utilizzati i valori mediani dei parametri, dato che NEVA ci restituisce per ogni parametro 5000 valori, dei quali sono stati scartati i primi 2000 nell'analisi.

Nelle *tabelle 4.1* e *4.2* riportate di seguito, si possono vedere i valori medi dei parametri, sia nel caso stazionario che non stazionario, per quanto riguarda la stazione di Cortina.

| V005_Cortina | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Parametri_medi | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| σ | 5.40 | 7.22 | 8.53 | 12.92 | 18.22 |
| ξ | 0.07 | 0.01 | -0.01 | -0.01 | 0.04 |
| μ | 16.23 | 24.58 | 34.69 | 47.87 | 66.58 |

Tabella 4.1 Parametri distribuzione GEV stazionari stazione Cortina

| V005_Cortina | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Parametri_medi | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| σ | 7.22 | 7.07 | 7.93 | 12.51 | 23.54 |
| ξ | -0.09 | 0.01 | 0.03 | 0.12 | -0.16 |
| μ_1 | 0.13 | 0.03 | 0.08 | 0.09 | 0.22 |
| μ_0 | 9.12 | 22.94 | 30.98 | 43.51 | 55.04 |
| $\mu(t)$ | 25.44 | 32.89 | 45.51 | 63.38 | 101.12 |
| $\mu(t)$ _mediana | 21.44 | 25.91 | 38.45 | 51.93 | 76.08 |

Tabella 4.2 Parametri distribuzione GEV non stazionari stazione Cortina

Partendo dei seguenti parametri è stato possibile determinarsi le altezze di precipitazione per ogni durata per ciascun tempo di ritorno.

Nel caso del modello stazionario si è utilizzata la seguente formulazione:

$$h(t) = \mu + \frac{\sigma}{\xi} \left[(-LN \left(1 - \frac{1}{t} \right))^{(-\xi)} - 1 \right] \quad (4.1)$$

| Durata_1h | |
|-----------|--------------------------------|
| TR | Altezza di precipitazione [mm] |
| 2 | 18.24 |
| 5 | 24.77 |
| 10 | 29.38 |
| 20 | 34.03 |
| 50 | 40.40 |
| 100 | 45.45 |

Tabella 4.3 Altezze di precipitazione, modello stazionario, durata 1 ora, Cortina

Nella tabella 4.3 sono mostrate le altezze ottenute per la durata di 1 ora per ogni tempo di ritorno della stazione di Cortina.

Nel caso del modello non stazionario invece si è utilizzata la seguente formulazione:

$$h(t) = \mu(t) + \frac{\sigma}{\xi} \left[(-LN \left(1 - \frac{1}{t} \right))^{(-\xi)} - 1 \right] \quad (4.2)$$

Il parametro di posizione $\mu(t)$ è stato considerato variabile nel tempo secondo la seguente relazione:

$$\mu(t) = \mu_1 * rank + \mu_0 \quad (4.3)$$

Nella seguente formula μ_0 rappresenta il valor medio del parametro di posizione, μ_1 la mediana del coefficiente temporale, mentre il rank non è altro che la posizione che occupa il dato di precipitazione nella serie di valori disposta in ordine crescente.

Questo valore è stato calcolato per ogni dato di precipitazione per la serie di valori disposta di ordine crescente. Dopo di che il valore da andare ad utilizzare nella formulazione per la determinazione dell'altezza di precipitazione è stato determinato tramite due differenti procedure:

- utilizzando la mediana del valore temporale;
- utilizzando il valore che corrisponde al 95 percentile.

| Durata_1h | | |
|------------------|---|---|
| TR | h [mm] $\mu(t)$_mediana | h [mm] $\mu(t)$ 95 percentile |
| 2 | 23.15 | 25.67 |
| 5 | 30.84 | 33.45 |
| 10 | 35.65 | 38.68 |
| 20 | 40.08 | 43.52 |
| 50 | 45.39 | 49.59 |
| 100 | 49.17 | 54.58 |

Tabella 4.4 Altezze di precipitazione, modello non stazionario, durata 1 ora, Cortina

Nella *tabella 4.4* possiamo vedere i valori di altezza calcolati facendo riferimento ai due diversi valori di parametro di posizione per la durata di 1 ora e per i diversi tempi di ritorno considerati.

Una volta che questo procedimento è stato ripetuto per ogni durata e ogni tempo di ritorno, si è potuto procedere con la costruzione delle CPP.

Nelle tabelle e nei grafici seguenti (tabella 4.5, 4.6, 4.7 figura 4.1, 4.2, 4.3) è mostrato il riassunto dei risultati per quanto riguarda la stazione di Cortina.

| MODELLO STAZIONARIO | | | | | |
|---------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 18.24 | 1 | 24.77 | 1 | 29.38 |
| 3 | 27.23 | 3 | 35.46 | 3 | 40.94 |
| 6 | 37.81 | 6 | 47.42 | 6 | 53.75 |
| 12 | 52.60 | 12 | 67.12 | 12 | 76.65 |
| 24 | 73.31 | 24 | 94.82 | 24 | 109.65 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 34.03 | 1 | 40.40 | 1 | 45.45 |
| 3 | 46.23 | 3 | 53.11 | 3 | 58.29 |
| 6 | 59.80 | 6 | 67.58 | 6 | 73.39 |
| 12 | 85.74 | 12 | 97.41 | 12 | 106.09 |
| 24 | 124.34 | 24 | 144.04 | 24 | 159.34 |

Tabella 4.5 Riassunto altezze di precipitazione, modello stazionario, Cortina

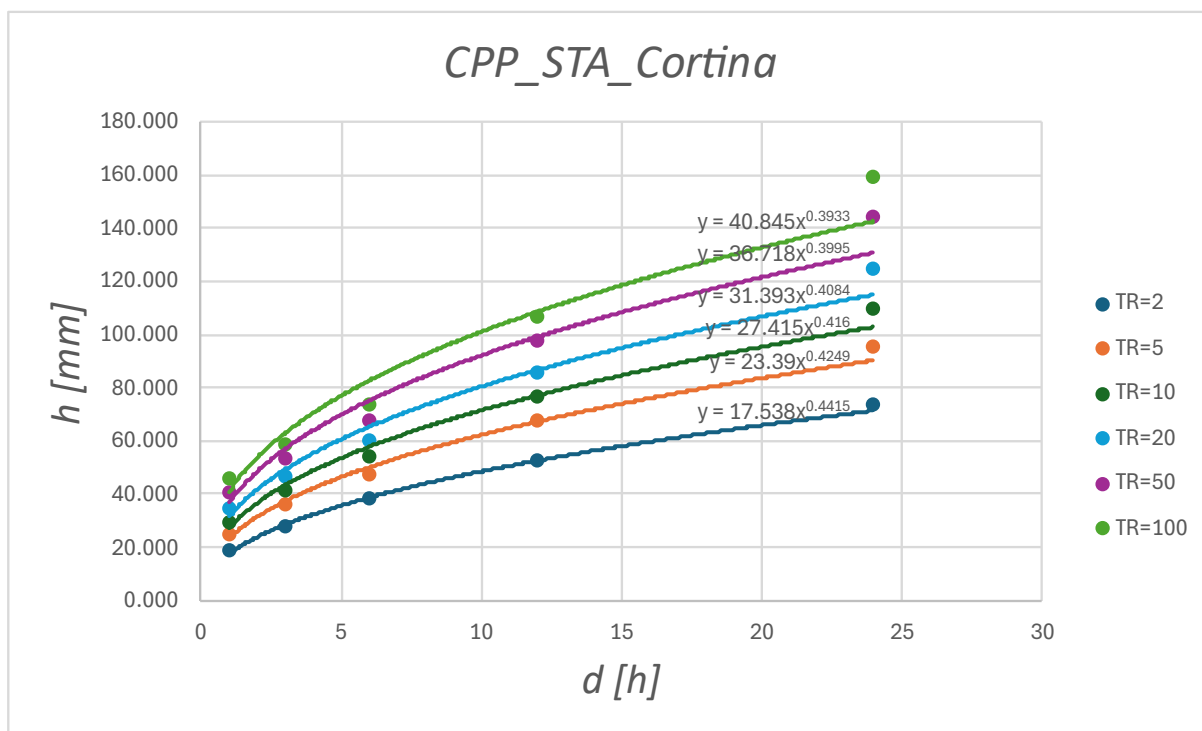


Figura 4.1 Curva di possibilità pluviometrica, modello stazionario, Cortina

| MODELLO NON STAZIONARIO $\mu(t)$_mediana | | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 23.15 | 1 | 30.84 | 1 | 35.65 |
| 3 | 28.65 | 3 | 36.80 | 3 | 42.28 |
| 6 | 41.38 | 6 | 50.45 | 6 | 56.71 |
| 12 | 56.20 | 12 | 71.94 | 12 | 83.80 |
| 24 | 82.72 | 24 | 106.05 | 24 | 119.36 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 40.08 | 1 | 45.39 | 1 | 49.17 |
| 3 | 47.65 | 3 | 54.72 | 3 | 60.04 |
| 6 | 62.76 | 6 | 70.66 | 6 | 76.81 |
| 12 | 96.16 | 12 | 114.27 | 12 | 129.06 |
| 24 | 130.55 | 24 | 143.17 | 24 | 151.54 |

Tabella 4.6 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, mediana, Cortina

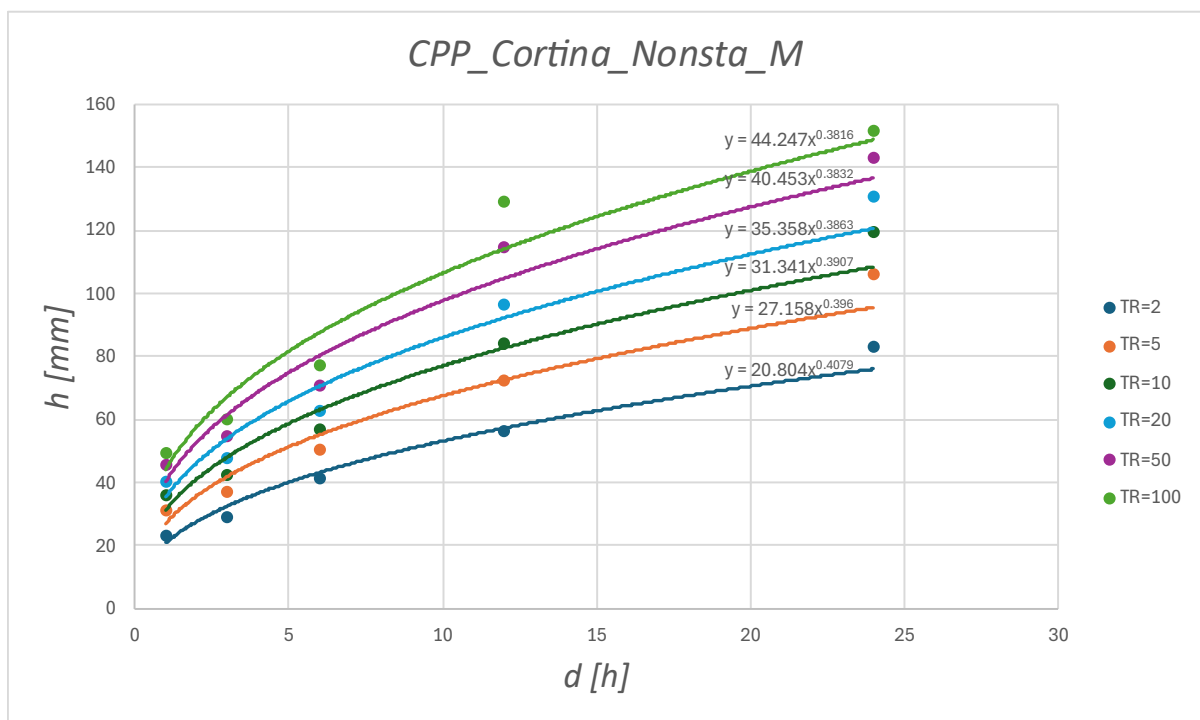


Figura 4.2 Curva di possibilità pluviometrica, modello non stazionario, mediana, Cortina

| MODELLO NON STAZIONARIO $\mu(t)$ 95percentile | | | | | |
|---|--------|-------|--------|--------|--------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 25.67 | 1 | 33.45 | 1 | 38.68 |
| 3 | 31.21 | 3 | 39.80 | 3 | 45.48 |
| 6 | 44.22 | 6 | 54.16 | 6 | 61.39 |
| 12 | 60.21 | 12 | 77.62 | 12 | 90.79 |
| 24 | 89.74 | 24 | 113.27 | 24 | 126.71 |
| TR=2 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 43.52 | 1 | 49.59 | 1 | 54.58 |
| 3 | 51.06 | 3 | 58.30 | 3 | 63.93 |
| 6 | 68.27 | 6 | 77.58 | 6 | 84.55 |
| 12 | 104.77 | 12 | 125.58 | 12 | 142.95 |
| 24 | 138.37 | 24 | 151.49 | 24 | 160.10 |

Tabella 4.7 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, 95 percentile, Cortina

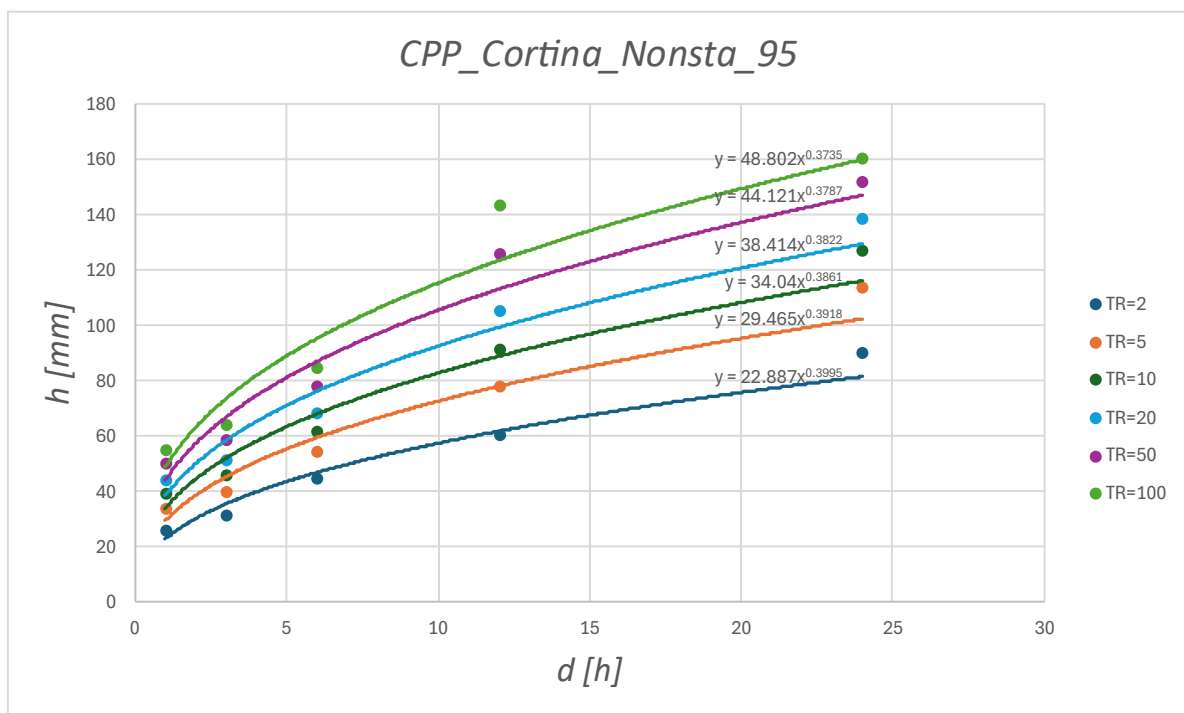


Figura 4.3 Curva di possibilità pluviometrica, modello non stazionario, 95 percentile, Cortina

Le equazioni che si possono vedere all'interno dei vari grafici rappresentano proprio l'equazione di ciascuna curva di possibilità pluviometrica, che è caratterizzata dalla seguente forma:

$$h(t) = at^n \quad (4.4)$$

I parametri a e n sono stati determinati tramite la regressione in scala logaritmica utilizzando i valori di altezza di precipitazione che sono stati calcolati per ogni durata, utilizzando le seguenti formule:

$$n = \frac{N \sum(\ln d \cdot \ln h) - (\sum \ln d) (\sum \ln h)}{N \sum(\ln d)^2 - (\sum \ln d)^2} \quad (4.5)$$

$$\ln a = \frac{(\sum \ln h \cdot \sum \ln d^2) - (\sum \ln d \cdot \sum(\ln d \cdot \ln h))}{N \cdot \sum \ln d^2 - (\sum \ln d)^2} \quad (4.6)$$

Dove:

- N : numero di dati, uguale al numero di durate considerate;
- $\ln d$: è il logaritmo naturale delle durate considerate;
- $\ln h$: è il logaritmo naturale delle altezze di precipitazione associate a ciascuna durata.

A tale scopo si riporta la *tabella 4.8* che è stata calcolata per la determinazione dei suddetti parametri per quanto riguarda la stazione di Cortina per tempo di ritorno uguale a 2 e parametro di posizione calcolato tramite mediana.

| TR=2 $\mu(t)$ _mediana | | | | | | | | |
|------------------------|-------|------|------|---------|------------------|------|-------|------|
| d[h] | h[mm] | lnd | lnh | lnd*lnh | lnd ² | lna | a | n |
| 1 | 23.15 | 0.00 | 3.14 | 0.00 | 0.00 | 3.04 | 20.80 | 0.41 |
| 3 | 28.65 | 1.10 | 3.36 | 3.69 | 1.21 | | | |
| 6 | 41.38 | 1.79 | 3.72 | 6.67 | 3.21 | | | |
| 12 | 56.20 | 2.48 | 4.03 | 10.01 | 6.17 | | | |
| 24 | 82.72 | 3.18 | 4.42 | 14.03 | 10.10 | | | |

Tabella 4.8 Esempio calcoli per la determinazione dei parametri a ed n

4.1 RISULTATI ANOMALI

Nella costruzione delle curve di possibilità pluviometrica tramite metodo bayesiano si sono riscontrati diversi risultati anomali, in particolare si sono ottenuti sia altezze di precipitazione associate a una durata minore superiori rispetto a quella relativa a una durata maggiore, sia altezze estremamente elevate, soprattutto per tempi di ritorno grandi.

La precipitazione cumulata rappresenta il totale di pioggia che cade in un determinato intervallo di tempo quindi, all'aumentare del tempo, il volume di precipitazione non può diminuire.

Si riportano, per esempio, le anomalie che si sono riscontrate per le stazioni di Arabba, Treviso e Chiampo.

Esse si sono presentate nel caso di modello non stazionario sia con $\mu(t)$ determinato tramite mediana che con $\mu(t)$ determinato tramite il metodo del 95 percentile.

Nel caso della stazione di Arabba, si sono riscontrate anomalie sia per quanto riguarda valori di altezza di precipitazione associati a durate minori, superiori a quelli associati a durate superiori, che un'importante anomalia per quanto riguarda i valori di altezze che si sono ottenuti per tempo di ritorno di 50 e 100 anni, in quanto presentano dei valori estremamente alti.

Nelle tabelle e nei grafici sottostanti si mostrano i risultati ottenuti per la stazione di Treviso.

| V014_Arabba | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Parametri_medi | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| σ | 4.81 | 5.48 | 6.49 | 14.51 | 34.03 |
| ξ | -0.08 | -0.11 | 0.12 | 1.07 | -0.16 |
| μ_1 | 0.02 | -0.02 | -0.06 | -0.09 | 0.87 |
| μ_0 | 15.96 | 27.95 | 40.21 | 48.48 | 11.64 |
| $\mu(t)$ | 20.88 | 31.61 | 39.39 | 45.96 | 107.01 |
| $\mu(t)$ _mediana | 17.94 | 26.21 | 34.63 | 40.08 | 95.63 |

Tabella 4.9 Parametri distribuzione GEV, modello non stazionario, Arabba

| MODELLO NON STAZIONARIO $\mu(t)$ _mediana | | | | | |
|---|----------|-------|----------|--------|---------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 19.60315 | 1 | 24.63169 | 1 | 27.69 |
| 3 | 28.24414 | 3 | 33.86199 | 3 | 37.21 |
| 6 | 37.08176 | 6 | 45.24439 | 6 | 51.33 |
| 12 | 46.93812 | 12 | 95.45896 | 12 | 180.86 |
| 24 | 106.1381 | 24 | 138.6977 | 24 | 157.10 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 30.45 | 1 | 33.81 | 1 | 36.18 |
| 3 | 40.16 | 3 | 43.63 | 3 | 46.01 |
| 6 | 57.76 | 6 | 66.99 | 6 | 74.53 |
| 12 | 360.74 | 12 | 933.00 | 12 | 1939.99 |
| 24 | 172.79 | 24 | 190.97 | 24 | 202.81 |

Tabella 4.10 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, mediana, Arabba

| MODELLO NON STAZIONARIO $\mu(t)$ 95percentile | | | | | |
|---|--------|-------|---------|--------|---------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 20.74 | 1 | 25.99 | 1 | 29.37 |
| 3 | 29.97 | 3 | 35.84 | 3 | 39.52 |
| 6 | 38.43 | 6 | 47.82 | 6 | 55.71 |
| 12 | 50.94 | 12 | 113.55 | 12 | 232.06 |
| 24 | 116.45 | 24 | 150.84 | 24 | 170.58 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 32.52 | 1 | 36.52 | 1 | 39.40 |
| 3 | 42.84 | 3 | 46.74 | 3 | 49.41 |
| 6 | 64.45 | 6 | 77.80 | 6 | 89.51 |
| 12 | 495.62 | 12 | 1392.52 | 12 | 3068.77 |
| 24 | 187.58 | 24 | 206.68 | 24 | 218.92 |

Tabella 4.11 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, 95 percentile, Arabba

Nel caso della stazione di Treviso, le anomalie hanno interessato invece le altezze di precipitazione per la durata di 12 ore a partire da un tempo di ritorno di 20 anni, sia nel caso di $\mu(t)$ determinato con mediana che con 95 percentile.

Si mostrano di seguito i risultati ottenuti per la stazione di Treviso.

| V035_Treviso | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Parametri_medi | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| σ | 8.24 | 9.99 | 12.14 | 14.65 | 20.14 |
| ξ | -0.04 | 0.01 | -0.02 | 0.23 | -0.07 |
| μ_1 | 0.09 | 0.07 | 0.12 | 0.11 | -0.02 |
| μ_0 | 23.03 | 30.71 | 35.16 | 43.77 | 63.23 |
| $\mu(t)$ | 38.44 | 44.66 | 57.82 | 70.04 | 79.62 |
| $\mu(t)$ _mediana | 31.49 | 37.40 | 46.92 | 54.63 | 61.19 |

Tabella 4.12 Parametri distribuzione GEV, modello non stazionario, Treviso

| MODELLO NON STAZIONARIO $\mu(t)$ _mediana | | | | | |
|---|--------|-------|--------|--------|--------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 34.45 | 1 | 43.45 | 1 | 49.27 |
| 3 | 41.30 | 3 | 52.74 | 3 | 60.35 |
| 6 | 51.27 | 6 | 64.87 | 6 | 73.52 |
| 12 | 59.53 | 12 | 80.39 | 12 | 97.05 |
| 24 | 68.40 | 24 | 89.66 | 24 | 102.72 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 54.65 | 1 | 61.35 | 1 | 66.24 |
| 3 | 67.60 | 3 | 77.07 | 3 | 84.17 |
| 6 | 81.75 | 6 | 92.45 | 6 | 100.12 |
| 12 | 116.32 | 12 | 146.99 | 12 | 174.47 |
| 24 | 114.77 | 24 | 129.39 | 24 | 139.52 |

Tabella 4.13 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, mediana, Treviso

| MODELLO NON STAZIONARIO $\mu(t)$ _95percentile | | | | | |
|--|--------|-------|-----------|--------|--------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 37.34 | 1 | 47.340882 | 1 | 53.79 |
| 3 | 45.00 | 3 | 57.69 | 3 | 66.54 |
| 6 | 55.85 | 6 | 69.93 | 6 | 79.26 |
| 12 | 66.36 | 12 | 89.41 | 12 | 108.77 |
| 24 | 73.56 | 24 | 95.72 | 24 | 110.01 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 59.90 | 1 | 67.47 | 1 | 73.33 |
| 3 | 75.55 | 3 | 87.72 | 3 | 96.78 |
| 6 | 88.22 | 6 | 100.11 | 6 | 109.66 |
| 12 | 132.90 | 12 | 172.70 | 12 | 209.54 |
| 24 | 123.03 | 24 | 138.69 | 24 | 150.03 |

Tabella 4.14 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, 95 percentile, Treviso

Anche nella stazione di Chiampo le anomalie si sono verificate sempre per la durata di 12 ore per entrambi i metodi di determinazione del $\mu(t)$. Inoltre, si è presentata un'importante anomalia per quanto riguarda i valori di altezze che si sono ottenuti per tempo di ritorno di 50 e 100 anni, in quanto presentano dei valori estremamente alti.

Di seguito si mostrano i risultati della stazione Chiampo.

| V059_Chiampo | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Parametri_medi | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| σ | 8.29 | 18.09 | 16.03 | 13.78 | 43.18 |
| ξ | -0.10 | -0.05 | -0.31 | 1.00 | -0.23 |
| μ_1 | 0.03 | 0.57 | 0.11 | 0.11 | 1.11 |
| μ_0 | 26.55 | -5.49 | 41.10 | 44.18 | -0.81 |
| $\mu(t)$ | 39.04 | 58.39 | 68.04 | 64.57 | 121.11 |
| $\mu(t)$ _mediana | 29.79 | 49.94 | 51.92 | 55.12 | 106.47 |

Tabella 4.15 Parametri distribuzione GEV, modello non stazionario, Chiampo

| MODELLO NON STAZIONARIO $\mu(t)$ _mediana | | | | | |
|---|--------|-------|--------|--------|---------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 32.81 | 1 | 40.90 | 1 | 45.95 |
| 3 | 56.64 | 3 | 76.31 | 3 | 89.22 |
| 6 | 59.36 | 6 | 72.71 | 6 | 79.43 |
| 12 | 61.09 | 12 | 100.27 | 12 | 162.28 |
| 24 | 121.87 | 24 | 161.21 | 24 | 182.76 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 50.52 | 1 | 56.10 | 1 | 60.02 |
| 3 | 100.96 | 3 | 115.78 | 3 | 126.47 |
| 6 | 84.65 | 6 | 89.90 | 6 | 93.08 |
| 12 | 282.02 | 12 | 630.45 | 12 | 1194.01 |
| 24 | 199.97 | 24 | 218.27 | 24 | 229.58 |

Tabella 4.16 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, mediana, Chiampo

| MODELLO NON STAZIONARIO $\mu(t)$ _95percentile | | | | | |
|--|--------|-------|---------|--------|---------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 35.18 | 1 | 43.59 | 1 | 48.83 |
| 3 | 61.73 | 3 | 82.97 | 3 | 97.34 |
| 6 | 63.66 | 6 | 77.27 | 6 | 84.34 |
| 12 | 64.59 | 12 | 116.10 | 12 | 207.31 |
| 24 | 133.18 | 24 | 173.63 | 24 | 195.65 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 53.49 | 1 | 58.99 | 1 | 62.78 |
| 3 | 112.19 | 3 | 133.53 | 3 | 151.36 |
| 6 | 89.98 | 6 | 95.77 | 6 | 99.17 |
| 12 | 401.07 | 12 | 1020.94 | 12 | 2126.47 |
| 24 | 214.23 | 24 | 235.31 | 24 | 250.50 |

Tabella 4.17 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, 95 percentile, Chiampo

Queste numerosi risultati anomali che si sono riscontrati nella costruzione delle curve di possibilità pluviometrica tramite metodo bayesiano, risultano essere non coerenti da un punto di vista fisico, in quanto sono in contrasto con quello che è il comportamento teorico delle curve CPP, le quali devono essere caratterizzate da

un andamento monotono crescente con l'aumentare della durata dell'evento di pioggia.

Una delle prime possibili cause per questo comportamento risiede nella natura dell'approccio bayesiano stesso siccome, si basa sulla stima di una distribuzione a priori, definita dalla seguente relazione:

$$P(A | B) = \frac{P(B|A) P(A)}{P(B)} \quad (4.7)$$

Dove:

- $P(A | B)$ è la probabilità di A sapendo B;
- $P(B | A)$ è la probabilità di osservare B se A è vera;
- $P(A)$ è la probabilità iniziale (a priori);
- $P(B)$ è la probabilità totale di osservare B.

Il valore di quest'ultima è impostato tramite il file di testo "prior" nei dati di input del codice NEVA.

Essa porta ad esplorare regioni di valori non fisicamente plausibili per quanto riguarda i parametri della distribuzione di probabilità GEV.

Questo riguarda tutti i parametri ma, in particolar modo, il parametro di forma ξ , che risulta essere estremamente sensibile dato che, nella formulazione utilizzata, si trova sia al denominatore che come esponente di un logaritmo naturale. Infatti, valori positivi elevati possono portare ad avere altezze di precipitazione molto estreme, in particolare per tempi di ritorno elevati.

Un'altra possibile causa potrebbe essere la qualità delle serie storiche dei dati di precipitazione di partenza, dalle quali il modello bayesiano risulta essere influenzato. Nel caso di scarsa qualità delle serie, il modello potrebbe generare una maggiore dispersione dei parametri stimati rispetto ai metodi classici.

Al fine di risolvere questi risultati anomali, e costruire quindi delle curve CPP coerenti, sono stati ripetuti i passaggi adottando non più l'approccio bayesiano, bensì il metodo della massima verosimiglianza, del quale si parlerà nel capitolo successivo.

4.1.1 METODO DELLA MASSIMA VEROSIMIGLIANZA

Il metodo della massima verosimiglianza, che si è utilizzato per risolvere le anomalie delle stazioni, è basato su un concetto estremamente importante, ovvero che i parametri della distribuzione sono scelti in modo da massimizzare la probabilità di osservare i dati che sono effettivamente disponibili. Da un punto di vista matematico, la funzione di verosimiglianza, data una serie di osservazioni indipendenti e distribuite x_1, x_2, \dots, x_n rappresentate da una funzione di densità che chiamiamo $f(x; \theta)$, è definita come il prodotto della probabilità associata a ciascuna osservazione:

$$L(\vartheta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \vartheta) \quad (4.8)$$

Quest'ultima permette di capire quanto sia compatibile il modello parametrico con i dati osservati. Al fine di semplificare il problema di ottimizzazione, si effettua il logaritmo della verosimiglianza, che consente di trasformare il prodotto in una sommatoria:

$$l(\vartheta) = \sum_{i=1}^n \log f(x_i; \vartheta) \quad (4.9)$$

La stima dei parametri si effettua quindi, andando a determinare il vettore θ che massimizza quest'ultima funzione:

$$\hat{\vartheta} = \arg \max_{\vartheta} L(\vartheta) \quad (4.10)$$

Nell'analisi delle precipitazioni estreme che si è condotta, come detto precedentemente, i dati sono stati modellati tramite la distribuzione GEV, nella quale compaiono il parametro di posizione μ , quello di scala σ e quello di forma ξ :

$$h(t) = \mu(t) + \frac{\sigma}{\xi} \left[(-LN \left(1 - \frac{1}{t} \right))^{(-\xi)} - 1 \right] \quad (4.11)$$

Partendo da questa distribuzione si costruisce la funzione di verosimiglianza e si determinano i parametri per la massimizzazione numerica. Dato che si sta facendo riferimento al caso non stazionario, si va ad introdurre una dipendenza temporale per quanto riguarda il parametro di posizione μ , che sarà espresso nel seguente modo:

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \quad (4.12)$$

Il metodo consente di andare a stimare direttamente i due coefficienti μ_1, μ_0 .

Una delle differenze principali rispetto al metodo Bayesiano sta nel fatto che, quello della massima verosimiglianza, permette di ottenere una stima puntuale basata solamente sui dati di precipitazione osservati, mentre l'altro fornisce una distribuzione di parametri che include anche informazioni a priori. In conseguenza a ciò, l'approccio Bayesiano risulta essere più flessibile ma maggiormente dipendente dalle assunzioni iniziali, mentre il metodo della massima verosimiglianza fornisce risultati più stabili e meno influenzati dalle scelte esterne.

Proprio per questo le anomalie che si sono riscontrate nei risultati ottenuti con metodo Bayesiano possono essere dettate dalla scelta della distribuzione a priori e dalla struttura dei dati, in particolare quando si è in presenza di serie ricostruite. Invece il metodo della massima verosimiglianza, dato che si basa unicamente sui dati osservati, permette di ottenere risultati più regolari.

Per svolgere i seguenti calcoli è stato implementato un apposito codice MATLAB che ha permesso, partendo dai dati di precipitazione utilizzati nell'analisi, di restituire una stima dei parametri per ogni durata di precipitazione considerata.

4.1.2 CONFRONTO RISULTATI

Nel seguente paragrafo si riportano i risultati ottenuti tramite il metodo della massima verosimiglianza delle stazioni di Arabba, Treviso e Chiampo.

| V014_Arabba | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Parametri_medi | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| σ | 4.00 | 5.26 | 6.66 | 12.01 | 18.78 |
| ξ | 0.12 | -0.04 | 0.07 | 0.00 | -0.01 |
| μ_1 | -0.05 | -0.02 | -0.04 | -0.04 | -0.14 |
| μ_0 | 19.15 | 27.92 | 39.73 | 55.30 | 77.82 |
| $\mu(t)_{finale}$ | 14.41 | 25.82 | 35.50 | 51.22 | 64.13 |

Tabella 4.18 Parametri distribuzione GEV, modello non stazionario, MLE, Arabba

| ARABBA_Massimaverosimiglianza | | | | | |
|-------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 15.90 | 1 | 20.98 | 1 | 24.75 |
| 3 | 27.73 | 3 | 33.49 | 3 | 37.18 |
| 6 | 37.97 | 6 | 45.99 | 6 | 51.63 |
| 12 | 55.63 | 12 | 69.27 | 12 | 78.32 |
| 24 | 71.00 | 24 | 92.09 | 24 | 105.93 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 28.70 | 1 | 34.34 | 1 | 39.01 |
| 3 | 40.62 | 3 | 44.95 | 3 | 48.09 |
| 6 | 57.31 | 6 | 65.08 | 6 | 71.22 |
| 12 | 87.02 | 12 | 98.29 | 12 | 106.76 |
| 24 | 119.10 | 24 | 136.02 | 24 | 148.60 |

Tabella 4.19 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, MLE, Arabba

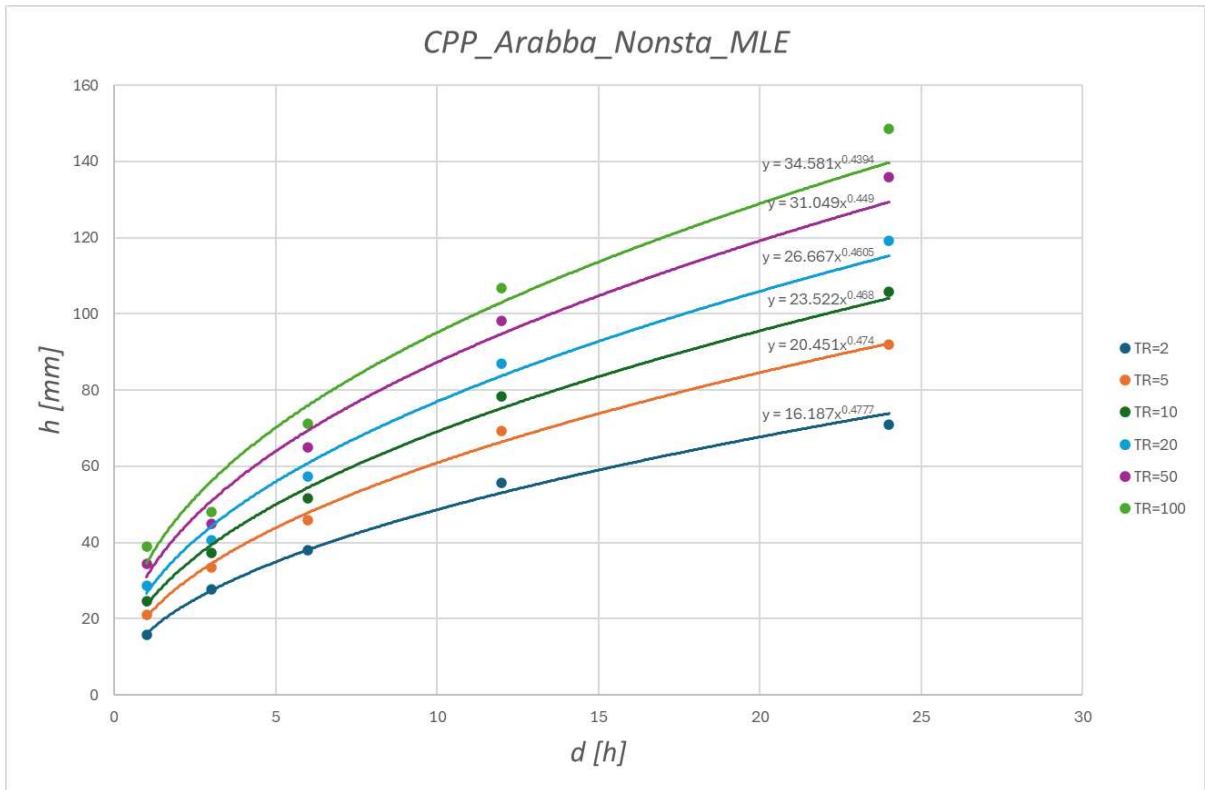


Figura 4.4 Curve di possibilità pluviometrica, MLE, Arabba

| V035_Treviso | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Parametri_medi | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| σ | 8.24 | 10.03 | 11.92 | 14.97 | 18.82 |
| ξ | -0.04 | -0.02 | -0.01 | 0.05 | 0.02 |
| μ_1 | 0.08 | 0.10 | 0.12 | 0.09 | 0.06 |
| μ_0 | 23.24 | 29.44 | 35.37 | 46.86 | 61.30 |
| $\mu(t)_\text{finale}$ | 31.32 | 39.07 | 46.87 | 55.76 | 67.46 |

Tabella 4.20 Parametri distribuzione GEV, modello non stazionario, MLE, Treviso

| TREVISO_Massimaverosimiglianza | | | | | |
|--------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 34.32 | 1 | 43.32 | 1 | 49.05 |
| 3 | 42.73 | 3 | 53.85 | 3 | 61.05 |
| 6 | 51.23 | 6 | 64.55 | 6 | 73.26 |
| 12 | 61.30 | 12 | 79.13 | 12 | 91.53 |
| 24 | 74.39 | 24 | 96.09 | 24 | 110.71 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 54.40 | 1 | 61.09 | 1 | 65.94 |
| 3 | 67.84 | 3 | 76.46 | 3 | 82.80 |
| 6 | 81.52 | 6 | 92.08 | 6 | 99.91 |
| 12 | 103.89 | 12 | 120.61 | 12 | 133.68 |
| 24 | 124.93 | 24 | 143.62 | 24 | 157.84 |

Tabella 4.21 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, MLE, Treviso

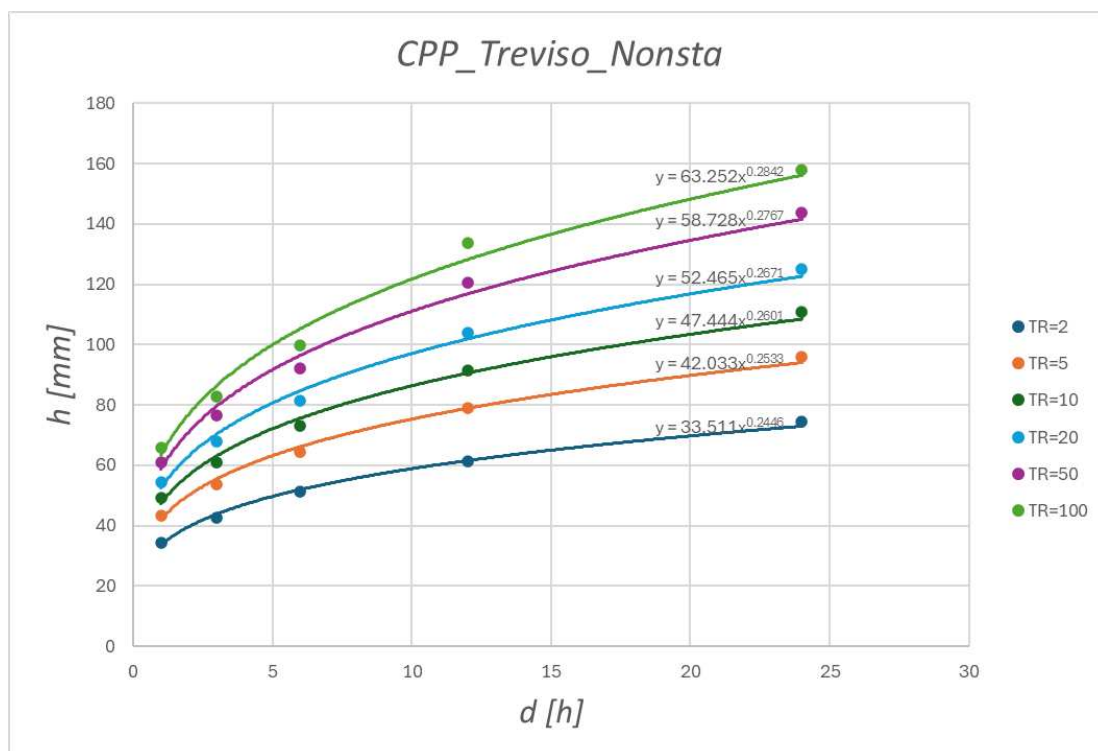


Figura 4.5 Curve di possibilità pluviometrica, MLE, Treviso

| V059_Chiampo | | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Parametri_medi | 1h | 3h | 6h | 12h | 24h |
| σ | 7.460 | 8.724 | 12.887 | 14.040 | 15.715 |
| ξ | 0.052 | 0.113 | -0.117 | 0.053 | 0.092 |
| μ_1 | 0.048 | 0.076 | 0.089 | 0.000 | -0.020 |
| μ_0 | 25.292 | 31.541 | 41.108 | 60.571 | 78.033 |
| $\mu(t)_\text{finale}$ | 29.963 | 38.881 | 49.780 | 60.579 | 76.129 |

Tabella 4.22 Parametri distribuzione GEV, modello non stazionario, MLE, Chiampo

| CHIAMPO_Massimaverosimiglianza | | | | | |
|--------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| TR=2 | | TR=5 | | TR=10 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 32.72 | 1 | 41.60 | 1 | 47.78 |
| 3 | 42.15 | 3 | 53.14 | 3 | 61.24 |
| 6 | 54.40 | 6 | 67.51 | 6 | 75.28 |
| 12 | 65.78 | 12 | 82.50 | 12 | 94.14 |
| 24 | 81.99 | 24 | 101.40 | 24 | 115.41 |
| TR=20 | | TR=50 | | TR=100 | |
| d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] | d[h] | h[mm] |
| 1 | 53.94 | 1 | 62.26 | 1 | 68.77 |
| 3 | 69.68 | 3 | 81.67 | 3 | 91.52 |
| 6 | 82.11 | 6 | 90.15 | 6 | 95.62 |
| 12 | 105.75 | 12 | 121.45 | 12 | 133.73 |
| 24 | 129.79 | 24 | 149.87 | 24 | 166.09 |

Tabella 4.23 Riassunto altezze di precipitazione, modello non stazionario, MLE, Chiampo

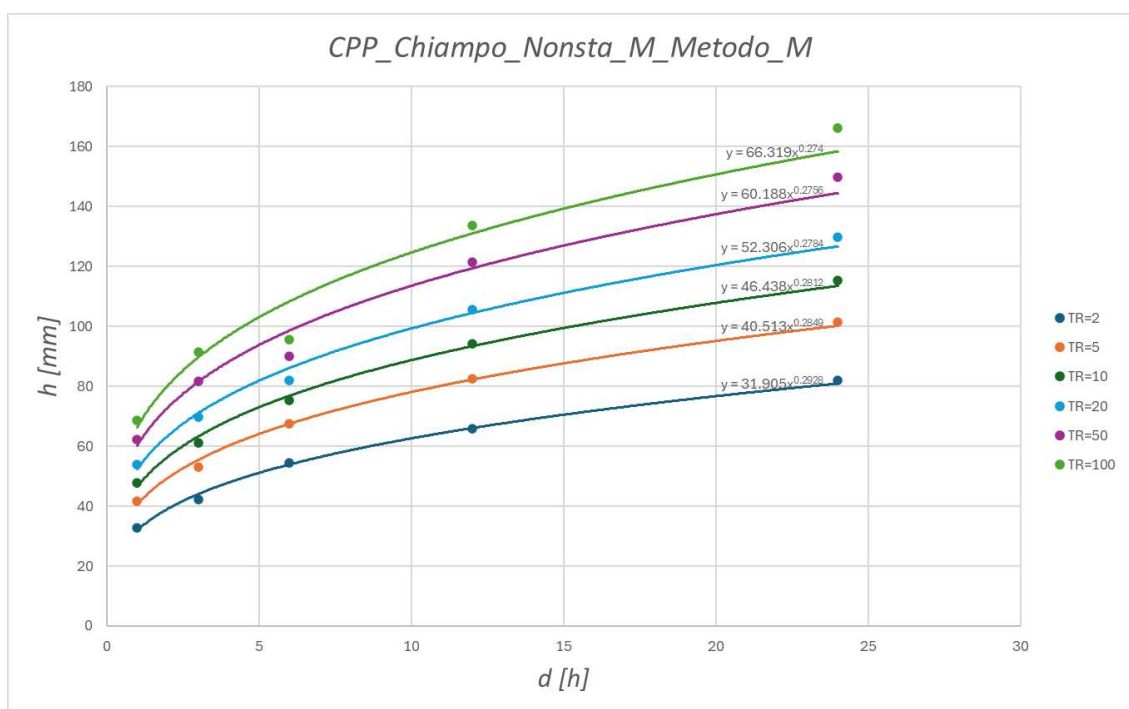


Figura 4.6 Curve di possibilità pluviometrica, MLE, Chiampo

Analizzando i seguenti risultati, è possibile vedere come, a differenza dell'approccio bayesiano, la stima dei parametri mediante metodo della massima verosimiglianza ha prodotto risultati coerenti da un punto di vista fisico e idrologico.

Infatti, le curve di possibilità pluviometrica che sono state ottenute mostrano un andamento coerente con quella che è la loro teoria, e anche le altezze di precipitazione mostrano valori coerenti, anche per tempi di ritorno elevati.

5. APPLICAZIONE A UN CASO STUDIO: VASCA DI LAMINAZIONE SUL TORRENTE MUSON

Una volta che sono state costruite le curve di possibilità pluviometrica (CPP), quest'ultime, sono state utilizzate per analizzare un caso studio reale, ovvero la progettazione di una vasca di laminazione sul torrente Muson, situata tra i comuni di Fonte e Riese Pio X in provincia di Treviso nella regione Veneto, con l'obiettivo di calcolare la portata nella sezione di chiusura e confrontarla con quella utilizzata in passato nella relazione progettuale ai fini dei calcoli di progetto.

L'intervento è stato realizzato con l'obiettivo di diminuire le criticità legate agli eventi di piena che interessano il territorio siccome, come evidenziato nella relazione progettuale, l'area in esame è soggetta a fenomeni ricorrenti di allagamento che hanno reso necessaria la realizzazione della seguente vasca di laminazione con funzione di regolazione della portata.

L'analisi condotta ha lo scopo di determinare la portata al colmo partendo dalle altezze di precipitazione determinate nei capitoli precedenti e di confrontarla con quella riportata nella relazione progettuale, al fine di verificare se ci possano essere stati dei cambiamenti dovuti ai cambiamenti climatici.

Nella *figura 5.1* viene mostrata la pianta della vasca di laminazione considerata [6].

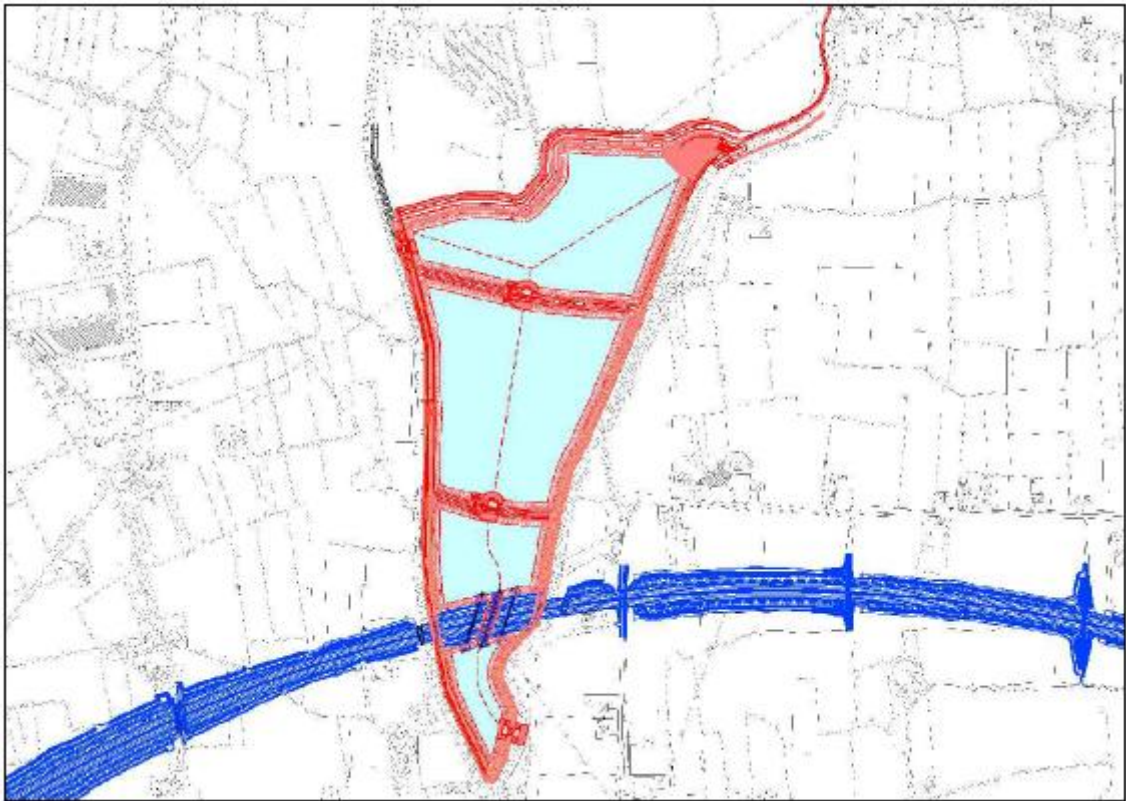


Figura 5.1 Vasca di laminazione sul torrente Muson

La metodologia seguita per la determinazione della portata è stata di tipo idrologico. Per prima cosa si è eseguita la caratterizzazione del bacino idrografico del fiume Muson mediante il software QGIS, per poi procedere con la costruzione dello ietogramma di tipo Chicago mediante il software chiamato Pioggia. Una volta fatto questo si è determinata la portata alla sezione di chiusura tramite il software di calcolo HEC-HMS.

5.1 DETERMINAZIONE DEL TEMPO DI CORRIVAZIONE E DEL CURVE NUMBER

La caratterizzazione morfologica del torrente Muson è stata eseguita mediante l'utilizzo del software QGIS, partendo dai dati territoriali che è possibile recuperare gratuitamente sul sito della regione Veneto, in particolare si è partiti dal Digital Terrein Model (DTM).

Quest'ultimo è stato, una volta caricato sul software, soggetto ad operazioni di ritaglio in corrispondenza dell'area d'interesse, in modo da ottenere il bacino idrografico del nostro torrente.

Nella *figura 5.2* si mostra il bacino idrografico ritagliato tramite il software QGIS.



Figura 5.2 Bacino idrografico torrente Muson

Una volta che è stato ritagliato il bacino è stato possibile andare a determinare le sue caratteristiche principali sfruttando gli strumenti del software. In particolare, si sono determinate l'area del bacino, la lunghezza dell'asta principale, ovvero il percorso del fiume più lungo all'interno del bacino che collega la sezione di chiusura con lo spartiacque più lontano, il dislivello medio e la quota della sezione di chiusura.

Risultati che è possibile vedere nella *tabella 5.1* sottostante:

| DATI BACINO | | |
|-------------|--------|-----------------|
| Area | 58.52 | Km ² |
| L | 10.82 | Km |
| H_media | 341.66 | m |
| H_outlet | 79.31 | m |
| H | 262.34 | m |

Tabella 5.1 Caratteristiche morfologiche bacino torrente Muson

Questi parametri sono stati successivamente utilizzati per la determinazione del tempo di corrivazione del bacino, ovvero il tempo che la goccia idrologicamente più svantaggiata all'interno del bacino impiega per raggiungere la sezione di chiusura. Per la sua determinazione si è scelto di utilizzare la formula di Giandotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}} \quad (5.1)$$

Dove H non è altro che la differenza tra l'altitudine media del bacino e l'altezza della sezione di chiusura.

Svolgendo i calcoli si è ottenuto un tempo di corrivazione per il bacino pari a 3,614 ore.

Una volta questo si è focalizzata l'attenzione sulla determinazione del Curve Number (CN), ovvero un parametro adimensionale compreso tra 0 e 100 che permette di indicare la capacità di ritenzione idrica del bacino. La stima è stata eseguita tramite l'analisi dell'uso del suolo utilizzando la Carta di Uso del Suolo che è stato possibile recuperare gratuitamente direttamente dal sito dell'ISPRA.

Una volta caricata sul software QGIS, come nel caso del DTM, anch'essa è stata ritagliata sul bacino idrografico, ed è stata analizzata al fine di andare ad individuare le diverse classi di copertura.

Nella *figura 5.3* sottostante si mostra la carta di uso del suolo ritagliata sul bacino idrografico di riferimento.

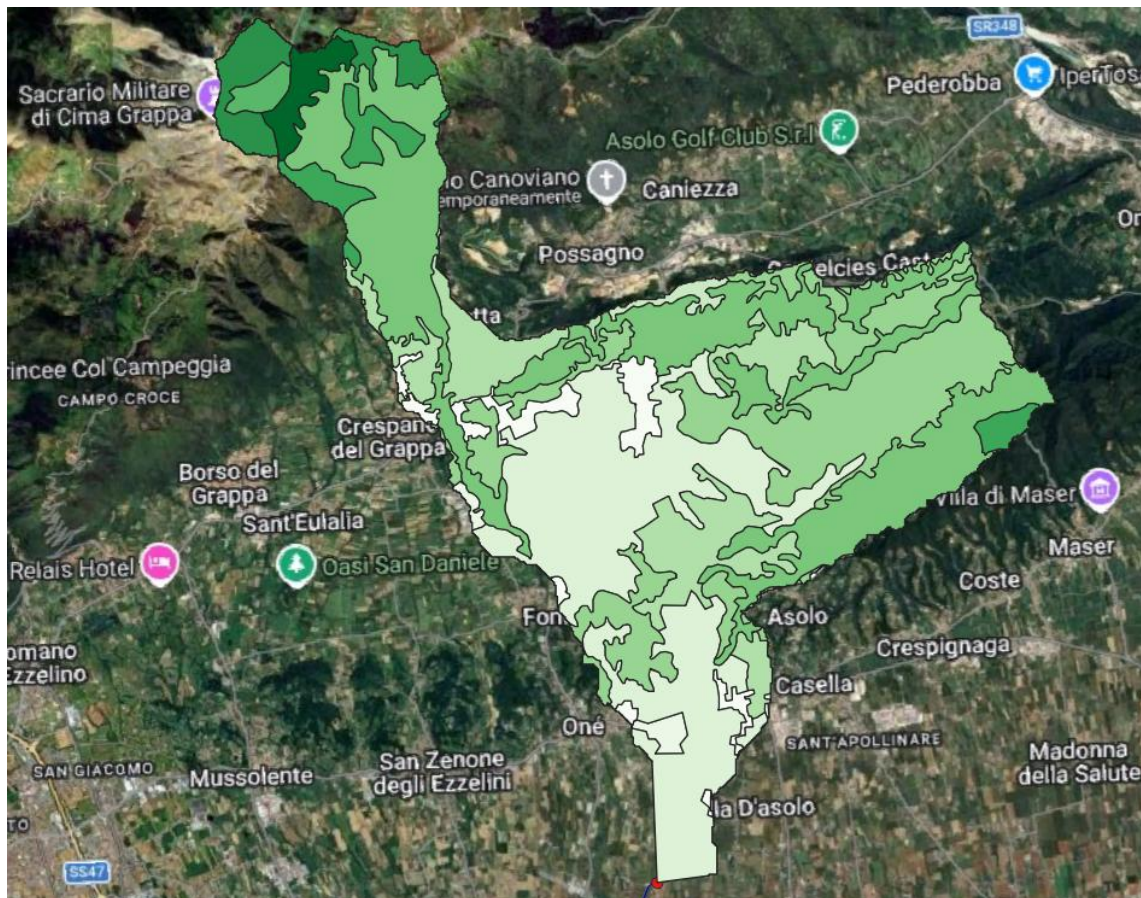


Figura 5.3 Carta uso suolo bacino torrente Muson

A ciascuna classe di uso del suolo, rappresentata da una diversa tonalità di verde come è possibile vedere nell'immagine, è stato assegnato un valore di CN sulla base della classificazione SCS.

Il valore complessivo del CN del bacino del torrente Muson è stato determinato mediante una media pesata rispetto alle superfici delle diverse classi:

$$CN_{medio} = \frac{\sum(CN_i \cdot A_i)}{A_{tot}} \quad (5.2)$$

Dove CN_i è il Curve Number della i -esima classe relativo alla sua area A_i , mentre A_{tot} è l'area totale del bacino.

Svolgendo il calcolo si è ottenuto un valore pari a circa 70, che sta a significare terreno prevalentemente agricolo con qualche presenza boschiva e urbanizzazione limitata.

5.2 COSTRUZIONE DELLO IETOGRAMMA CHICAGO

Al fine di rappresentare la distribuzione temporale della precipitazione di progetto, si è scelto di utilizzare lo ietogramma Chicago.

La sua scelta è stata dettata dal fatto che consente di rappresentare nel migliore dei modi eventi di pioggia intensi, che sono tipici delle condizioni critiche, è possibile ricavarlo direttamente dalle curve di possibilità pluviometrica (CPP), permette di scegliere la posizione del picco d'intensità dell'evento, ed infine fornisce dei risultati a favore di sicurezza generando portate più gravose. Proprio per questa serie di motivi lo ietogramma Chicago viene spesso utilizzato per la determinazione delle portate al colmo.

La sua costruzione è stata effettuata mediante l'utilizzo del software Pioggia sviluppato dal professor Moisello.

Come dati di input sono state utilizzate altezze di precipitazione per diverse durate, ovvero 10, 20, 30, 40, 50 minuti e 1, 3, 6, 12, 24 ore. Le altezze di precipitazione sotto l'ora sono state calcolate utilizzando l'equazione:

$$h(t) = at^n \quad (5.3)$$

dove come parametro a è stato utilizzato lo stesso che si è usato per determinare le altezze di precipitazione associate alle durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore, mentre il parametro n è stato posto uguale a 0.5.

Successivamente il software fornisce una serie di domande, come ad esempio la durata totale dell'evento di pioggia, che si è posta uguale al tempo di corrivazione calcolato precedentemente, il passo temporale, che si è posto uguale a 10 minuti,

il tipo di ietogramma che si vuole costruire, la posizione del picco nel caso dello ietogramma Chicago, che si posto in mezzeria ponendo il parametro r uguale a 0,5.

Sulla base delle risposte che vengono fornite il software restituisce lo ietogramma desiderato ottenuto partendo dai dati di input inseriti.

Nell'analisi si sono costruiti diversi ietogramma Chicago partendo da diversi dati di precipitazione, al fine di arrivare a vedere le possibili differenze nella determinazione del valore di portata al colmo a seconda del metodo di determinazione delle altezze di precipitazione e dei tempi di ritorno considerati.

In particolare, si sono considerati i dati per un tempo di ritorno di 50 e 100 anni della stazione di Cittadella ottenuti con il metodo della massima verosimiglianza, i dati di precipitazione determinati con il metodo bayesiano, con il parametro di posizione determinato sia tramite mediana che tramite 95 percentile, sempre per un tempo di ritorno di 50 e 100 anni e infine anche i dati ottenuti mediante metodo stazionario.

Nelle figure e nelle tabelle sottostanti si mostrano gli ietogramma Chicago ottenuti.

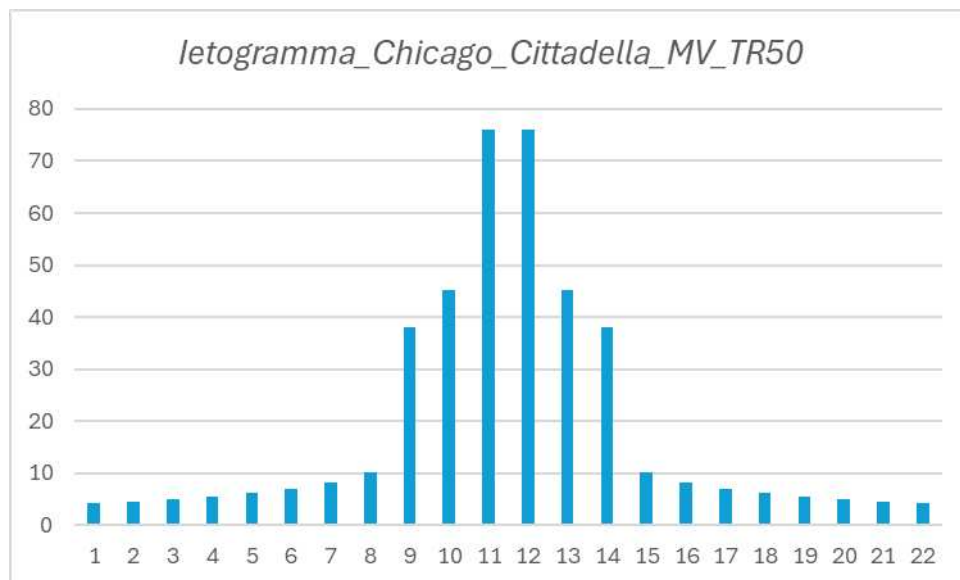


Figura 5.4 Ietogramma Chicago, MLE, TR50, Cittadella

| Int | H (mm) | P (mm/h) |
|-----|--------|----------|
| 1 | 0.71 | 4.25 |
| 2 | 0.77 | 4.6 |
| 3 | 0.84 | 5.02 |
| 4 | 0.92 | 5.54 |
| 5 | 1.04 | 6.2 |
| 6 | 1.18 | 7.07 |
| 7 | 1.38 | 8.29 |
| 8 | 1.69 | 10.12 |
| 9 | 6.35 | 38 |
| 10 | 7.56 | 45.28 |
| 11 | 12.68 | 75.93 |
| 12 | 12.68 | 75.91 |
| 13 | 7.56 | 45.28 |
| 14 | 6.35 | 38 |
| 15 | 1.69 | 10.12 |
| 16 | 1.38 | 8.29 |
| 17 | 1.18 | 7.07 |
| 18 | 1.04 | 6.2 |
| 19 | 0.92 | 5.54 |
| 20 | 0.84 | 5.02 |
| 21 | 0.77 | 4.6 |
| 22 | 0.71 | 4.25 |

Tabella 5.2 Dati relativi allo ietogramma nella figura precedente

Nella figura 5.4 e nella tabella 5.2 si mostrano i risultati ottenuti con la costruzione dello ietogramma Chicago per la stazione di Cittadella con dati determinati tramite metodo MLE per tempo di ritorno 50 anni.

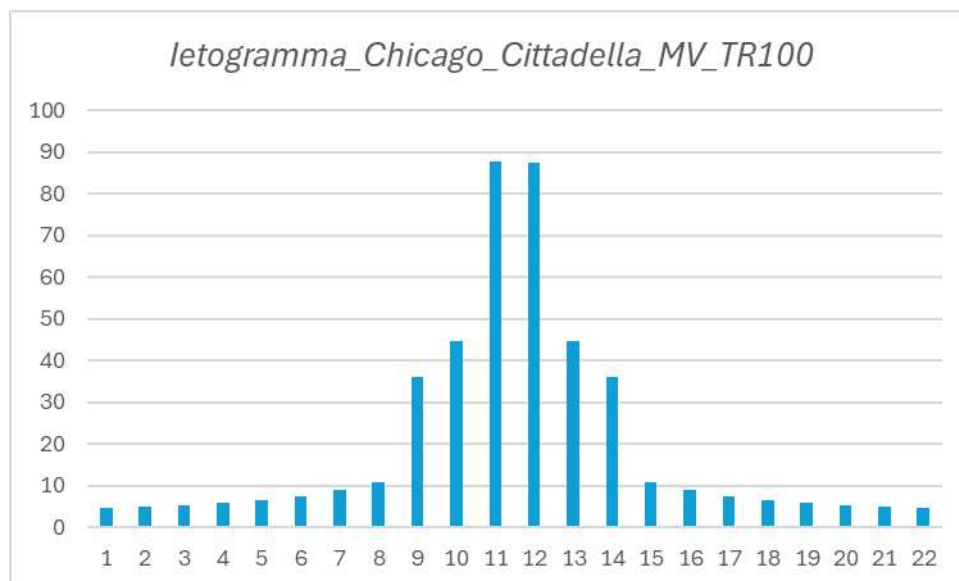


Figura 5.5 Ietogramma Chicago, MLE, TR100, Cittadella

| Int | H (mm) | P (mm/h) |
|-----|--------|----------|
| 1 | 0.75 | 4.51 |
| 2 | 0.82 | 4.88 |
| 3 | 0.89 | 5.33 |
| 4 | 0.98 | 5.88 |
| 5 | 1.1 | 6.58 |
| 6 | 1.25 | 7.51 |
| 7 | 1.47 | 8.8 |
| 8 | 1.79 | 10.74 |
| 9 | 6.01 | 35.96 |
| 10 | 7.47 | 44.71 |
| 11 | 14.64 | 87.66 |
| 12 | 14.63 | 87.6 |
| 13 | 7.47 | 44.71 |
| 14 | 6.01 | 35.96 |
| 15 | 1.79 | 10.74 |
| 16 | 1.47 | 8.8 |
| 17 | 1.25 | 7.51 |
| 18 | 1.1 | 6.58 |
| 19 | 0.98 | 5.88 |
| 20 | 0.89 | 5.33 |
| 21 | 0.82 | 4.88 |
| 22 | 0.75 | 4.51 |

Tabella 5.3 Dati relativi allo ietogramma nella figura precedente

Nella *figura 5.5* e nella *tabella 5.3* si mostrano i risultati ottenuti con la costruzione dello ietogramma Chicago per la stazione di Cittadella con dati determinati tramite metodo MLE per tempo di ritorno 100 anni.

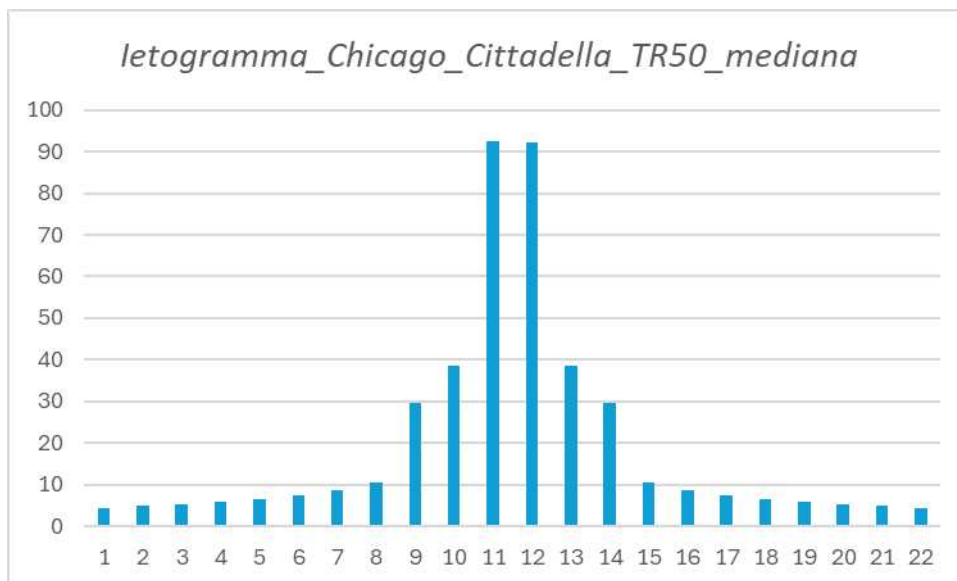


Figura 5.6 Ietogramma Chicago, metodo bayesiano, mediana, TR50 Cittadella

| Int | H (mm) | P (mm/h) |
|-----|--------|----------|
| 1 | 0.76 | 4.53 |
| 2 | 0.82 | 4.9 |
| 3 | 0.89 | 5.34 |
| 4 | 0.98 | 5.88 |
| 5 | 1.1 | 6.58 |
| 6 | 1.25 | 7.49 |
| 7 | 1.46 | 8.76 |
| 8 | 1.78 | 10.67 |
| 9 | 4.93 | 29.52 |
| 10 | 6.43 | 38.53 |
| 11 | 15.46 | 92.55 |
| 12 | 15.42 | 92.34 |
| 13 | 6.43 | 38.53 |
| 14 | 4.93 | 29.52 |
| 15 | 1.78 | 10.67 |
| 16 | 1.46 | 8.76 |
| 17 | 1.25 | 7.49 |
| 18 | 1.1 | 6.58 |
| 19 | 0.98 | 5.88 |
| 20 | 0.89 | 5.34 |
| 21 | 0.82 | 4.9 |
| 22 | 0.76 | 4.53 |

Tabella 5.4 Dati relativi allo ietogramma nella figura precedente

Nella *figura 5.6* e nella *tabella 5.4* si mostrano i risultati ottenuti con la costruzione dello ietogramma Chicago per la stazione di Cittadella con dati determinati tramite metodo bayesiano con parametro di posizione determinato tramite mediana per tempo di ritorno 50 anni.

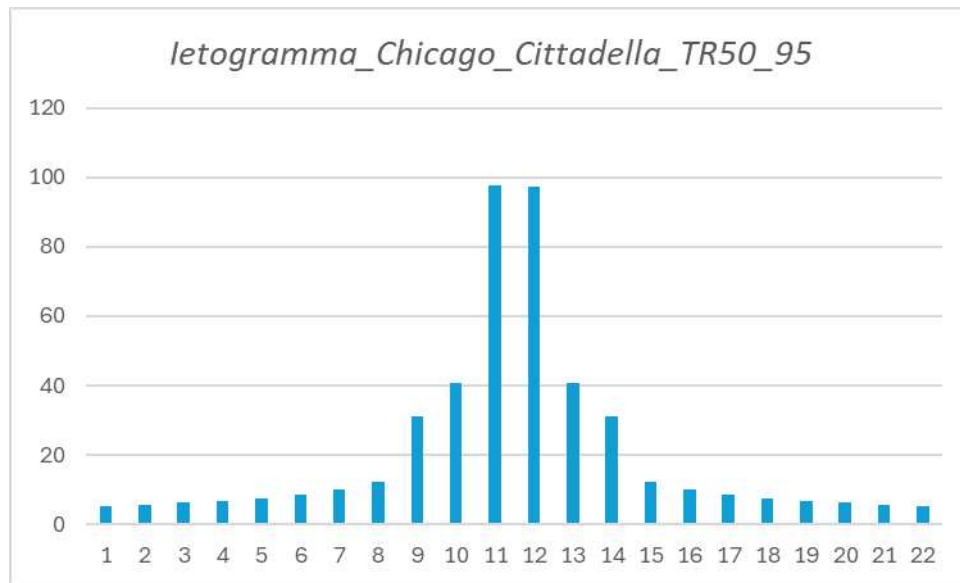


Figura 5.7 Ietogramma Chicago, metodo bayesiano, 95 percentile, TR50 Cittadella

| Int | H (mm) | P (mm/h) |
|------------|---------------|-----------------|
| 1 | 0.88 | 5.29 |
| 2 | 0.95 | 5.7 |
| 3 | 1.04 | 6.21 |
| 4 | 1.14 | 6.82 |
| 5 | 1.27 | 7.61 |
| 6 | 1.44 | 8.64 |
| 7 | 1.68 | 10.07 |
| 8 | 2.04 | 12.2 |
| 9 | 5.19 | 31.09 |
| 10 | 6.78 | 40.58 |
| 11 | 16.28 | 97.51 |
| 12 | 16.25 | 97.28 |
| 13 | 6.78 | 40.58 |
| 14 | 5.19 | 31.09 |
| 15 | 2.04 | 12.2 |
| 16 | 1.68 | 10.07 |
| 17 | 1.44 | 8.64 |
| 18 | 1.27 | 7.61 |
| 19 | 1.14 | 6.82 |
| 20 | 1.04 | 6.21 |
| 21 | 0.95 | 5.7 |
| 22 | 0.88 | 5.29 |

Tabella 5.5 Dati relativi allo ietogramma nella figura precedente

Nella *figura 5.7* e nella *tabella 5.5* si mostrano i risultati ottenuti con la costruzione dello ietogramma Chicago per la stazione di Cittadella con dati determinati tramite metodo bayesiano con parametro di posizione determinato tramite 95 percentile per tempo di ritorno 50 anni.

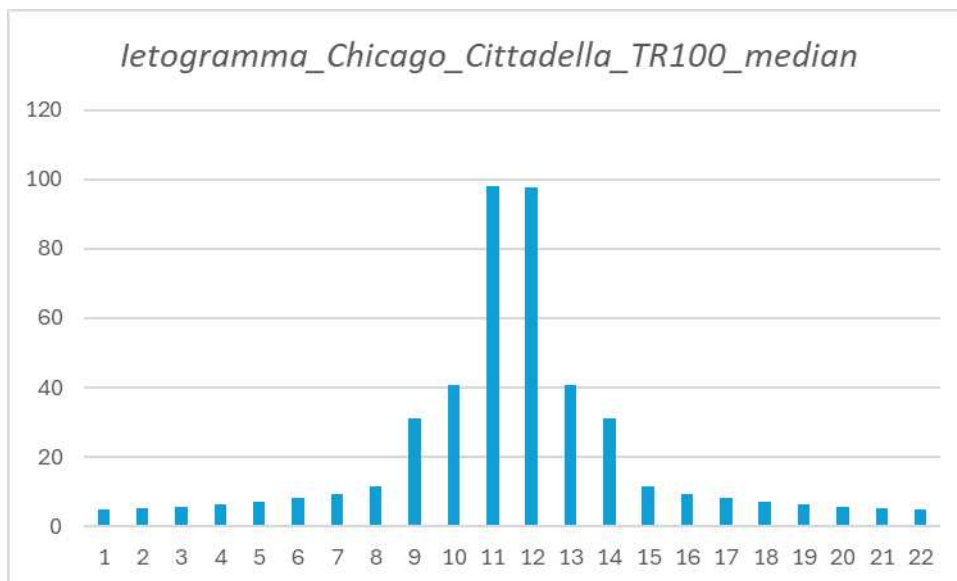


Figura 5.8 Ietogramma Chicago, metodo bayesiano, mediana, TR100 Cittadella

| Int | H (mm) | P (mm/h) |
|-----|--------|----------|
| 1 | 0.82 | 4.88 |
| 2 | 0.88 | 5.28 |
| 3 | 0.96 | 5.75 |
| 4 | 1.06 | 6.34 |
| 5 | 1.18 | 7.08 |
| 6 | 1.35 | 8.06 |
| 7 | 1.57 | 9.42 |
| 8 | 1.91 | 11.46 |
| 9 | 5.21 | 31.22 |
| 10 | 6.81 | 40.76 |
| 11 | 16.36 | 97.94 |
| 12 | 16.32 | 97.71 |
| 13 | 6.81 | 40.76 |
| 14 | 5.21 | 31.22 |
| 15 | 1.91 | 11.46 |
| 16 | 1.57 | 9.42 |
| 17 | 1.35 | 8.06 |
| 18 | 1.18 | 7.08 |
| 19 | 1.06 | 6.34 |
| 20 | 0.96 | 5.75 |
| 21 | 0.88 | 5.28 |
| 22 | 0.82 | 4.88 |

Tabella 5.6 Dati relativi allo ietogramma nella figura precedente

Nella *figura 5.8* e nella *tabella 5.6* si mostrano i risultati ottenuti con la costruzione dello ietogramma Chicago per la stazione di Cittadella con dati determinati tramite metodo bayesiano con parametro di posizione determinato tramite mediana per tempo di ritorno 100 anni.

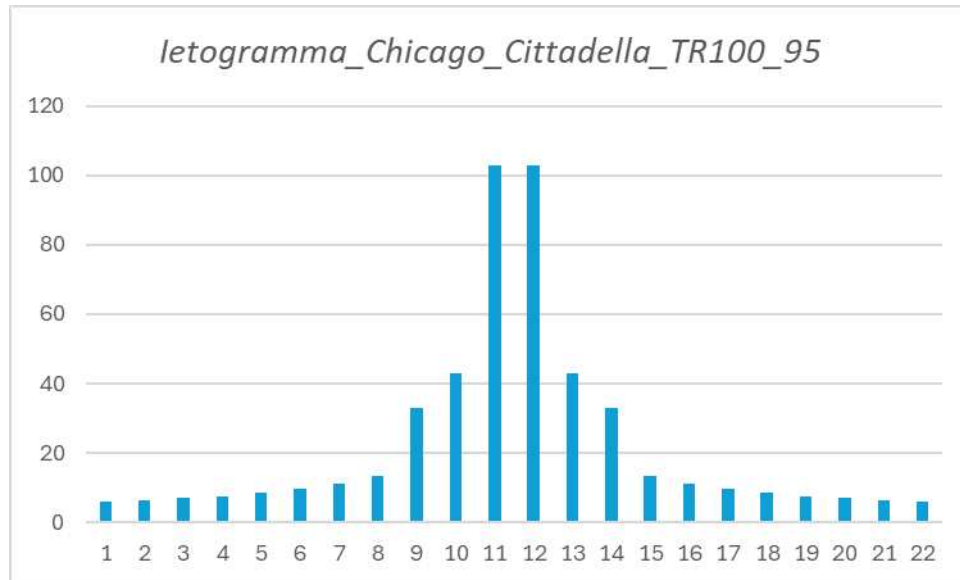


Figura 5.9 Ietogramma Chicago, metodo bayesiano, 95 percentile, TR100 Cittadella

| Int | H (mm) | P (mm/h) |
|------------|---------------|-----------------|
| 1 | 0.99 | 5.95 |
| 2 | 1.07 | 6.42 |
| 3 | 1.16 | 6.97 |
| 4 | 1.28 | 7.65 |
| 5 | 1.42 | 8.52 |
| 6 | 1.61 | 9.65 |
| 7 | 1.87 | 11.22 |
| 8 | 2.26 | 13.56 |
| 9 | 5.49 | 32.85 |
| 10 | 7.16 | 42.87 |
| 11 | 17.2 | 103.01 |
| 12 | 17.16 | 102.77 |
| 13 | 7.16 | 42.87 |
| 14 | 5.49 | 32.85 |
| 15 | 2.26 | 13.56 |
| 16 | 1.87 | 11.22 |
| 17 | 1.61 | 9.65 |
| 18 | 1.42 | 8.52 |
| 19 | 1.28 | 7.65 |
| 20 | 1.16 | 6.97 |
| 21 | 1.07 | 6.42 |
| 22 | 0.99 | 5.95 |

Tabella 5.7 Dati relativi allo ietogramma nella figura precedente

Nella *figura 5.9* e nella *tabella 5.7* si mostrano i risultati ottenuti con la costruzione dello ietogramma Chicago per la stazione di Cittadella con dati determinati tramite metodo bayesiano con parametro di posizione determinato tramite 95 percentile per tempo di ritorno 100 anni.

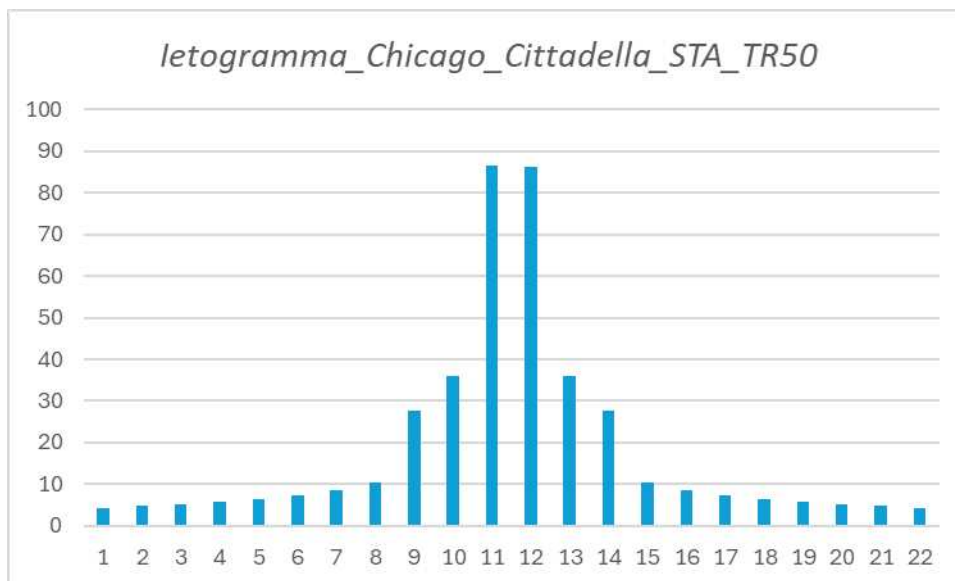


Figura 5.10 Ietogramma Chicago, metodo stazionario, TR50 Cittadella

| Int | H (mm) | P (mm/h) |
|-----|--------|----------|
| 1 | 0.74 | 4.41 |
| 2 | 0.8 | 4.77 |
| 3 | 0.87 | 5.19 |
| 4 | 0.95 | 5.72 |
| 5 | 1.07 | 6.39 |
| 6 | 1.21 | 7.26 |
| 7 | 1.42 | 8.48 |
| 8 | 1.72 | 10.31 |
| 9 | 4.61 | 27.59 |
| 10 | 6.01 | 36.01 |
| 11 | 14.44 | 86.49 |
| 12 | 14.41 | 86.29 |
| 13 | 6.01 | 36.01 |
| 14 | 4.61 | 27.59 |
| 15 | 1.72 | 10.31 |
| 16 | 1.42 | 8.48 |
| 17 | 1.21 | 7.26 |
| 18 | 1.07 | 6.39 |
| 19 | 0.95 | 5.72 |
| 20 | 0.87 | 5.19 |
| 21 | 0.8 | 4.77 |
| 22 | 0.74 | 4.41 |

Tabella 5.8 Dati relativi allo ietogramma nella figura precedente

Nella *figura 5.10* e nella *tabella 5.8* si mostrano i risultati ottenuti con la costruzione dello ietogramma Chicago per la stazione di Cittadella con dati determinati tramite metodo stazionario per tempo di ritorno 50 anni.

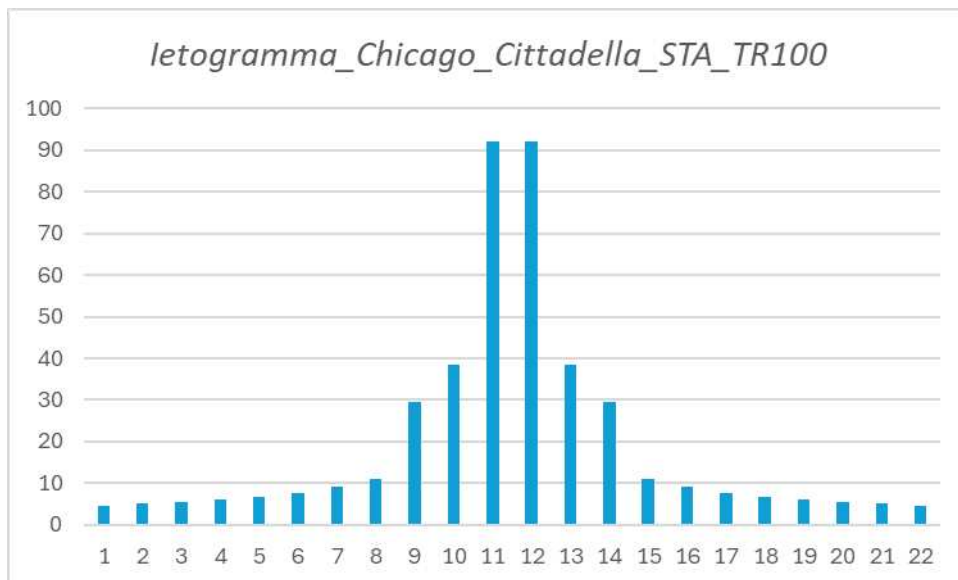


Figura 5.11 Ietogramma Chicago, metodo stazionario, TR100, Cittadella

| Int | H (mm) | P (mm/h) |
|------------|---------------|-----------------|
| 1 | 0.79 | 4.72 |
| 2 | 0.85 | 5.1 |
| 3 | 0.93 | 5.56 |
| 4 | 1.02 | 6.12 |
| 5 | 1.14 | 6.83 |
| 6 | 1.3 | 7.77 |
| 7 | 1.52 | 9.08 |
| 8 | 1.84 | 11.03 |
| 9 | 4.91 | 29.39 |
| 10 | 6.41 | 38.36 |
| 11 | 15.39 | 92.17 |
| 12 | 15.36 | 91.96 |
| 13 | 6.41 | 38.36 |
| 14 | 4.91 | 29.39 |
| 15 | 1.84 | 11.03 |
| 16 | 1.52 | 9.08 |
| 17 | 1.3 | 7.77 |
| 18 | 1.14 | 6.83 |
| 19 | 1.02 | 6.12 |
| 20 | 0.93 | 5.56 |
| 21 | 0.85 | 5.1 |
| 22 | 0.79 | 4.72 |

Tabella 5.9 Dati relativi allo ietogramma nella figura precedente

Nella *figura 5.11* e nella *tabella 5.9* si mostrano i risultati ottenuti con la costruzione dello ietogramma Chicago per la stazione di Cittadella con dati determinati tramite metodo stazionario per tempo di ritorno 100 anni.

I seguenti risultati sono stati poi utilizzati per determinarsi, per le varie casistiche considerate, la portata nella sezione di chiusura della vasca di laminazione tramite il software di calcolo HEC-HMS.

5.3 DETERMINAZIONE PORTATA AL COLMO TRAMITE HEC-HMS

Il software di calcolo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) è stato sviluppato dall’U.S Army Corps of Engineers, in particolar modo dal suo centro di ricerca, ovvero la Hydrologic Engineering Center.

Il programma è stato progettato al fine di simulare e i processi di trasformazione delle piogge in deflusso in un bacino idrografico e per analizzare nella maniera più affidabile possibile la previsione di piene e la progettazione di opere idrauliche.

Proprio per questa serie di ragioni si è scelto di utilizzarlo per la determinazione della portata al colmo della vasca di laminazione realizzata sul torrente Muson.

Per prima cosa sono stati caricati nel software lo shapefile e il DTM relativi al bacino idrografico del torrente Muson, ottenendo il risultato che è possibile vedere nella *figura 5.12* sottostante:

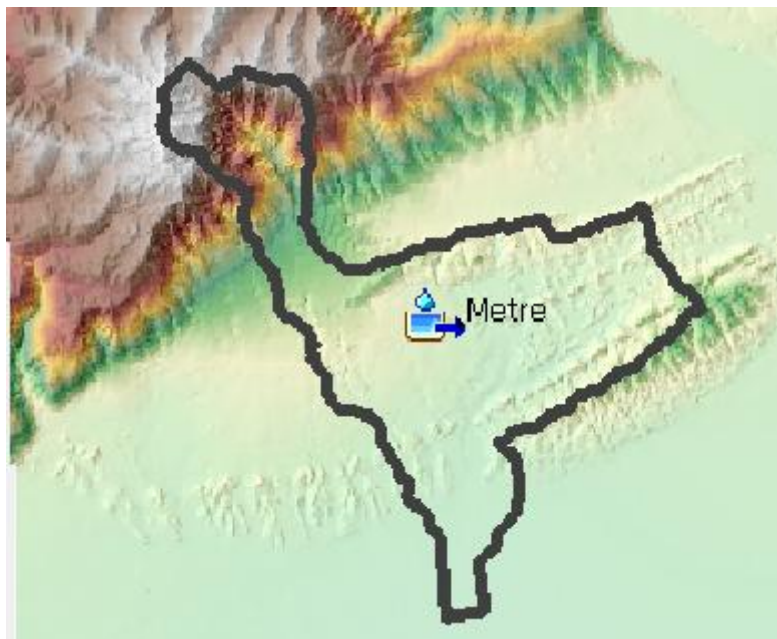


Figura 5.12 Bacino idrografico del torrente Muson in HEC-HMS

Dopo di che vengono specificati il metodo delle perdite e di trasformazione afflussi – deflussi che si vogliono utilizzare per la determinazione della portata.

In particolare, nel caso in esame, si è scelto di adottare il metodo SCS Curve Number (CN), spiegato nel *capitolo 5.1*, e, per la trasformazione afflussi – deflussi, l’SCS Unit Hydrograph.

Quest’ultimo è basato sul concetto di idrogramma unitario, il quale, mostra la risposta del bacino idrografico a una precipitazione efficace unitaria distribuita in modo uniforme sul bacino e nel tempo.

L’idrogramma viene definito tramite alcuni parametri del bacino, tra cui il tempo di ritardo “*lag time*”, funzione del tempo di corrivazione, e quindi legato alle caratteristiche morfologiche del bacino. Esso è stato determinato tramite la seguente relazione e poi opportunamente inserito nel software:

$$h_{lag} = 0.6t_c \quad (5.4)$$

Il metodo è basato su alcune ipotesi semplificative come, ad esempio, la linearità del sistema e la proporzionalità tra pioggia efficace e deflusso.

Per questo motivo, nell'utilizzo di HEC – HMS, il seguente metodo è molto apprezzato per la sua semplicità applicativa in quanto il numero di parametri richiesti è limitato.

Successivamente vengono impostati i parametri temporali della simulazione in particolare, si è fissato l'orario d'inizio alle 14 e l'orario di fine alle 23:40, con intervallo temporale pari a 10 minuti.

Dopo questi passaggi, per ogni casistica considerata relativamente alla stazione di Cittadella, a seconda della metodologia impiegata per la determinazione delle altezze di precipitazione (metodo bayesiano, metodo MLE e metodo stazionario) per diversi tempi di ritorno (50 e 100 anni), vengono caricati i dati degli ietogramma Chicago, creati precedentemente (attraverso la procedura spiegata nel *paragrafo 5.2*).

A questo punto, dopo aver eseguito le procedure precedentemente spiegate, è possibile avviare le diverse simulazioni.

Vengono quindi riportati di seguito i risultati ottenuti per ogni caso attraverso una tabella riassuntiva ed un grafico con l'andamento della portata alla sezione di chiusura in funzione del tempo (all'interno della finestra temporale precedentemente definita).

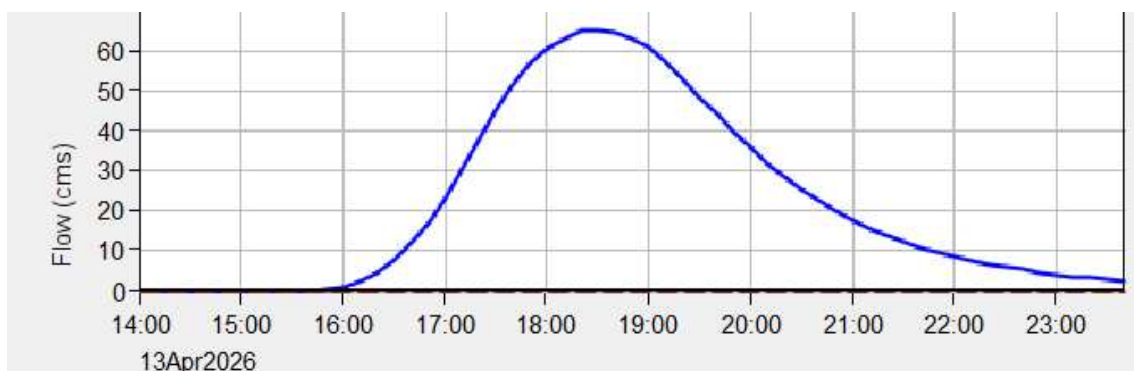


Figura 5.13 Andamento portata alla sezione di chiusura

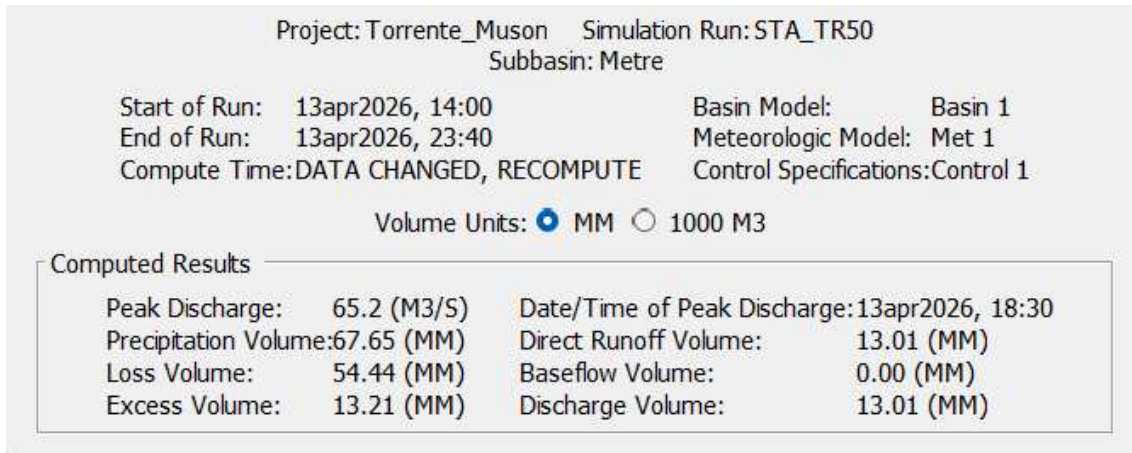


Figura 5.14 Risultati simulazione HEC-HMS

Nelle *figure 5.13 e 5.14* soprariportate si mostrano i risultati relativi al metodo stazionario per il tempo di ritorno 50 anni.

Dalla simulazione si è ottenuto un valore di portata alla sezione di chiusura di 65.2 m³/s.

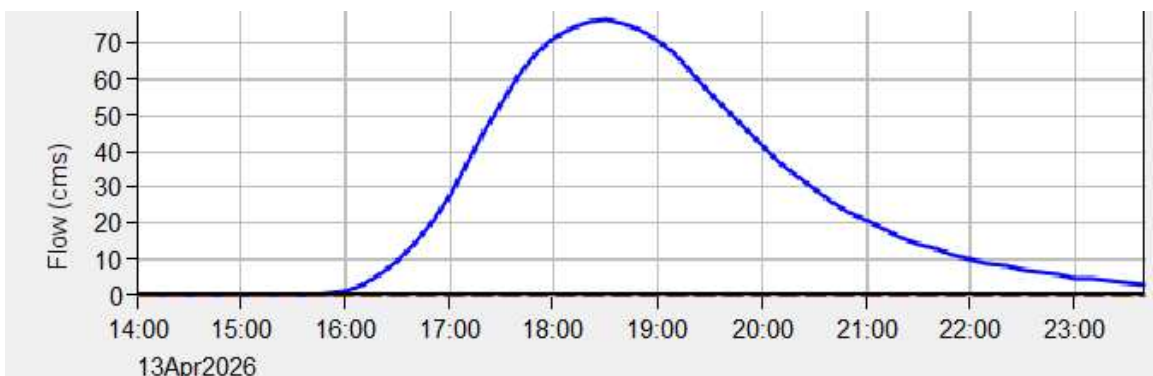


Figura 5.15 Andamento portata alla sezione di chiusura

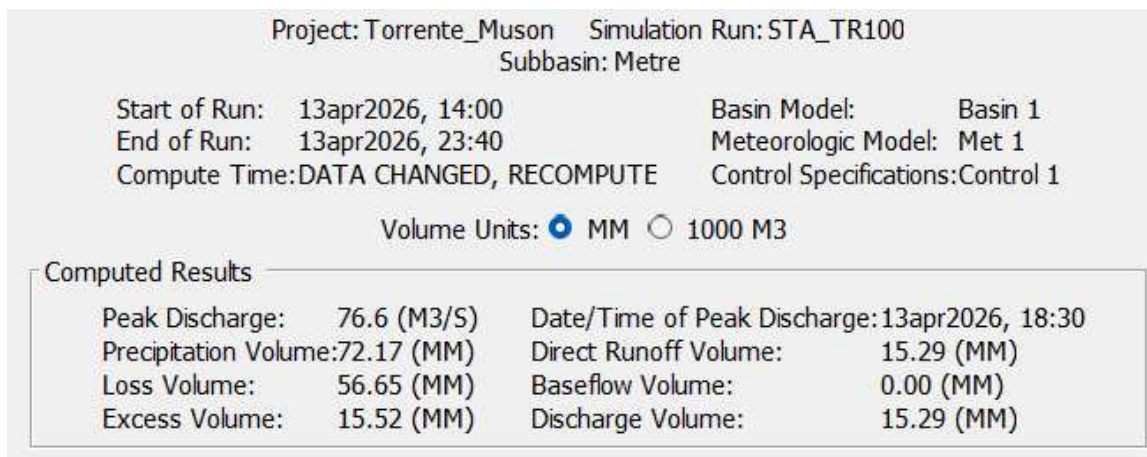


Figura 5.16 Risultati simulazione HEC-HMS

Nelle *figure 5.15 e 5.16* soprariportate si mostrano i risultati relativi al metodo stazionario per il tempo di ritorno 100 anni.

Dalla simulazione si è ottenuto un valore di portata alla sezione di chiusura di 76.6 m³/s.

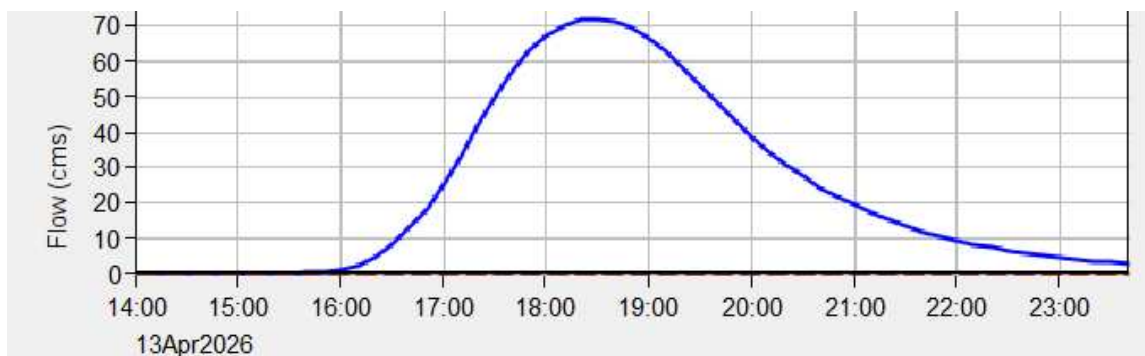


Figura 5.17 Andamento portata alla sezione di chiusura

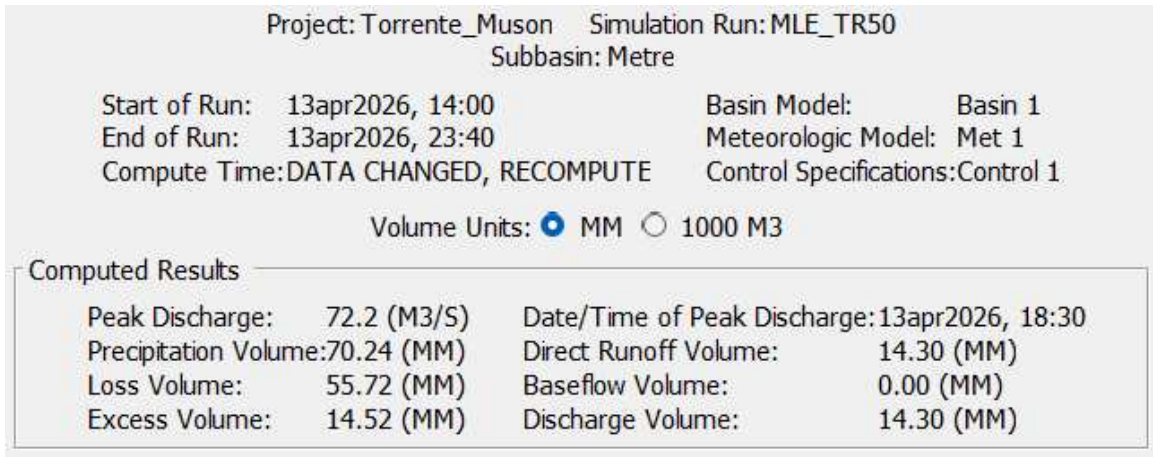


Figura 5.18 Risultati simulazione HEC-HMS

Nelle *figure 5.17 e 5.18* soprariportate si mostrano i risultati relativi al metodo della massima verosimiglianza per il tempo di ritorno 50 anni.

Dalla simulazione si è ottenuto un valore di portata alla sezione di chiusura di 72.2 m³/s.

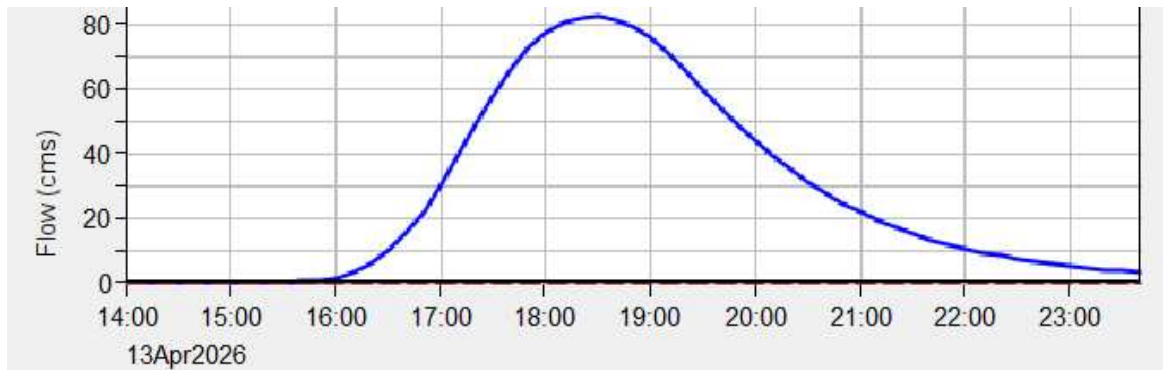


Figura 5.19 Andamento portata alla sezione di chiusura

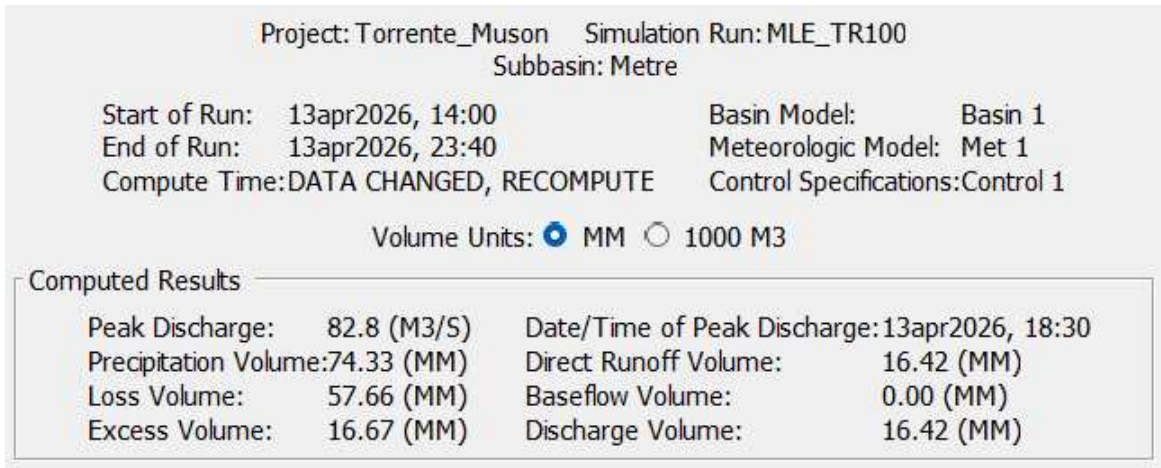


Figura 5.20 Risultati simulazione HEC-HMS

Nelle *figure 5.19 e 5.20* soprariportate si mostrano i risultati relativi al metodo della massima verosimiglianza per il tempo di ritorno 100 anni.

Dalla simulazione si è ottenuto un valore di portata alla sezione di chiusura di 82.8 m³/s.

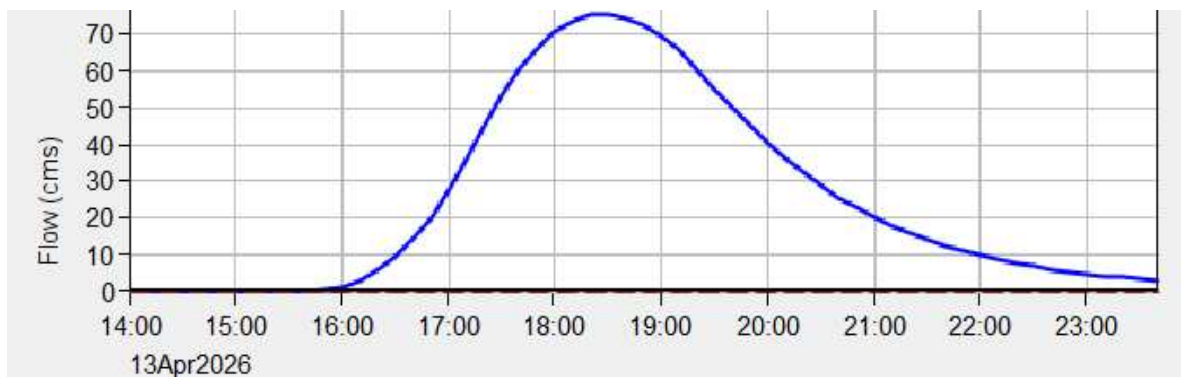


Figura 5.21 Andamento portata alla sezione di chiusura

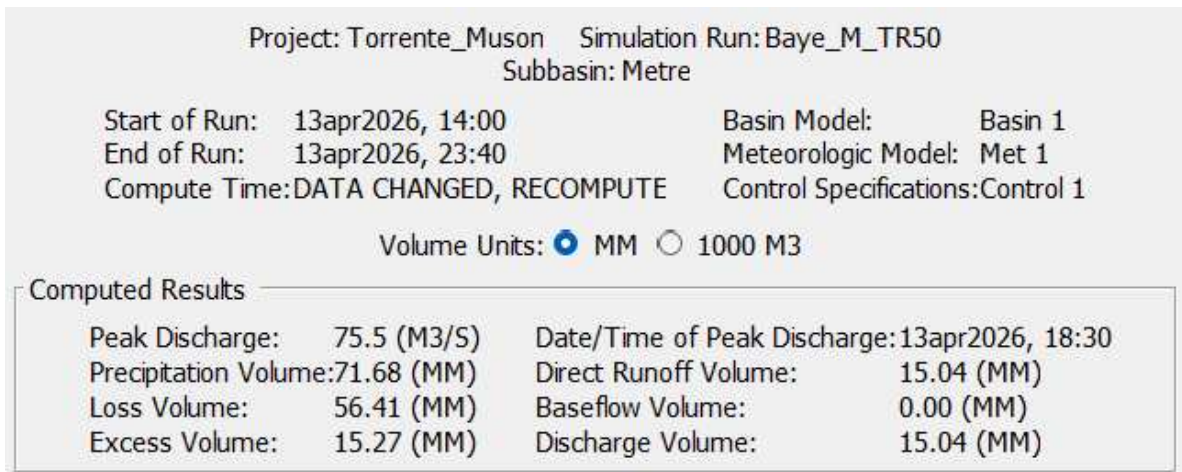


Figura 5.22 Risultati simulazione HEC-HMS

Nelle *figure 5.21 e 5.22* soprariportate si mostrano i risultati relativi al metodo bayesiano con parametro di posizione determinato con mediana per il tempo di ritorno 50 anni.

Dalla simulazione si è ottenuto un valore di portata alla sezione di chiusura di 75.5 m³/s.

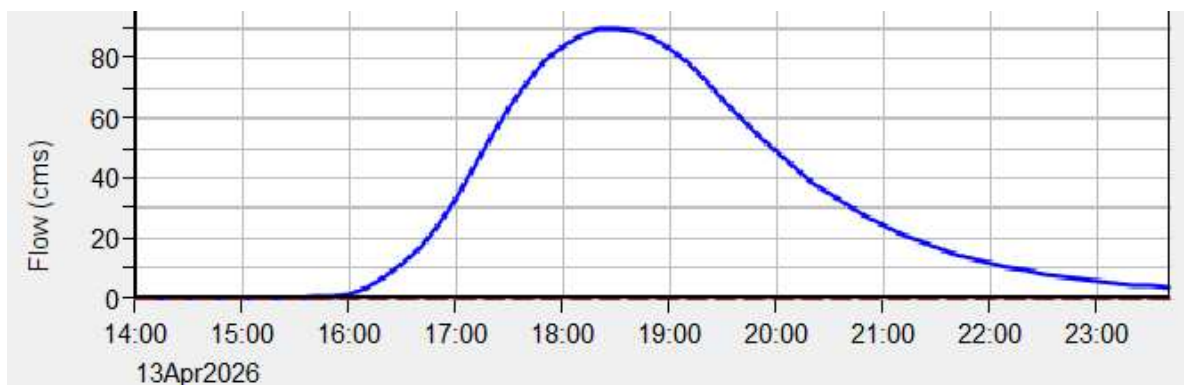


Figura 5.23 Andamento portata alla sezione di chiusura

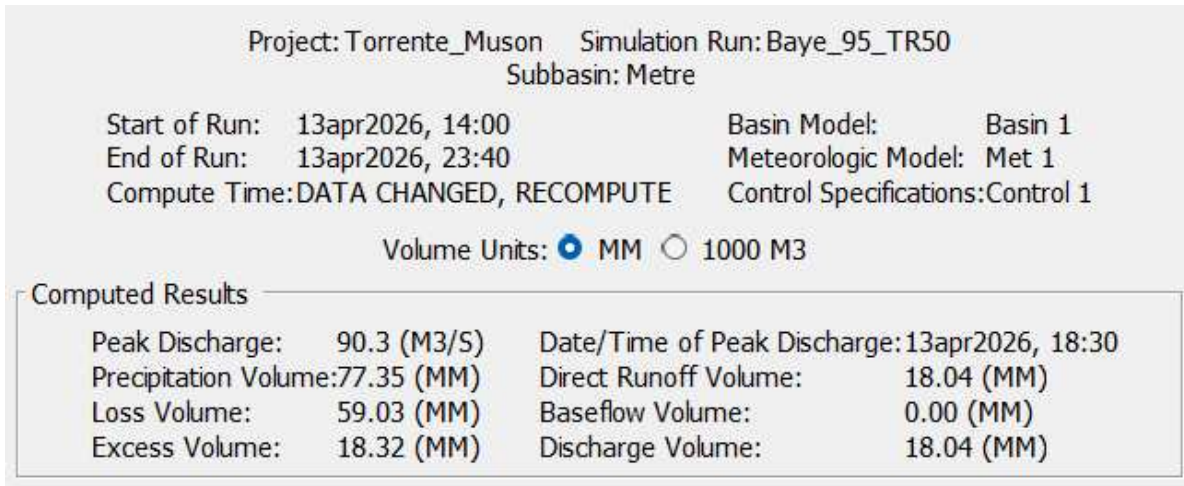


Figura 5.24 Risultati simulazione HEC-HMS

Nelle *figure 5.23 e 5.24* soprariportate si mostrano i risultati relativi al metodo bayesiano con parametro di posizione determinato con 95 percentile per il tempo di ritorno 50 anni.

Dalla simulazione si è ottenuto un valore di portata alla sezione di chiusura di 90.3 m³/s.

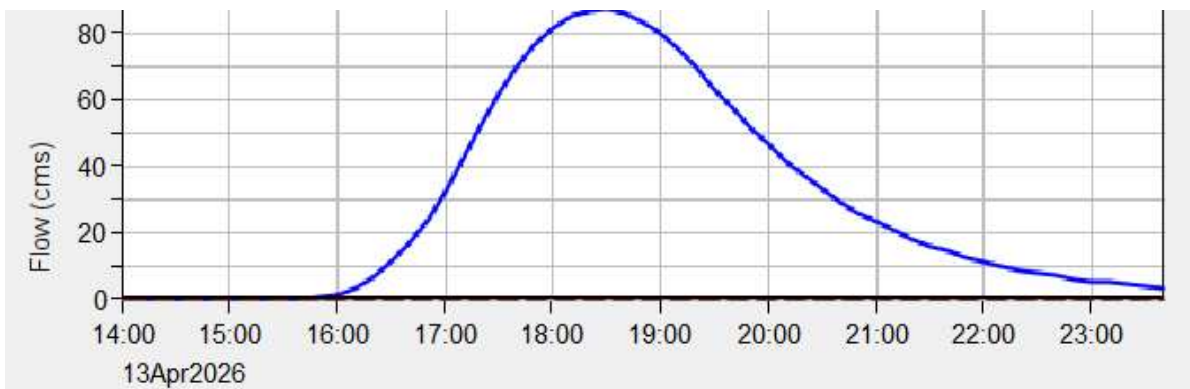


Figura 5.25 Andamento portata alla sezione di chiusura

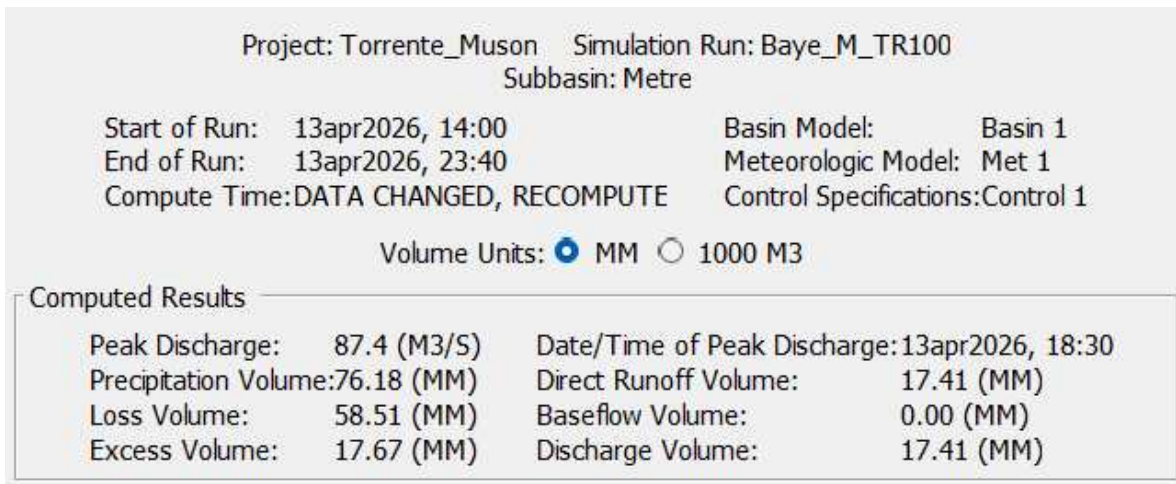


Figura 5.26 Risultati simulazione HEC-HMS

Nelle *figure 5.25 e 5.26* soprariportate si mostrano i risultati relativi al metodo bayesiano con parametro di posizione determinato con mediana per il tempo di ritorno 100 anni.

Dalla simulazione si è ottenuto un valore di portata alla sezione di chiusura di 87.4 m³/s.

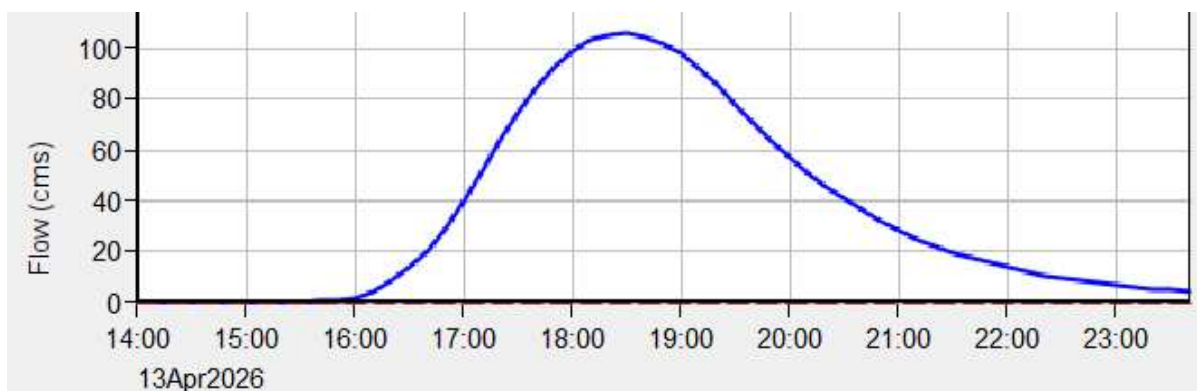


Figura 5.27 Andamento portata alla sezione di chiusura

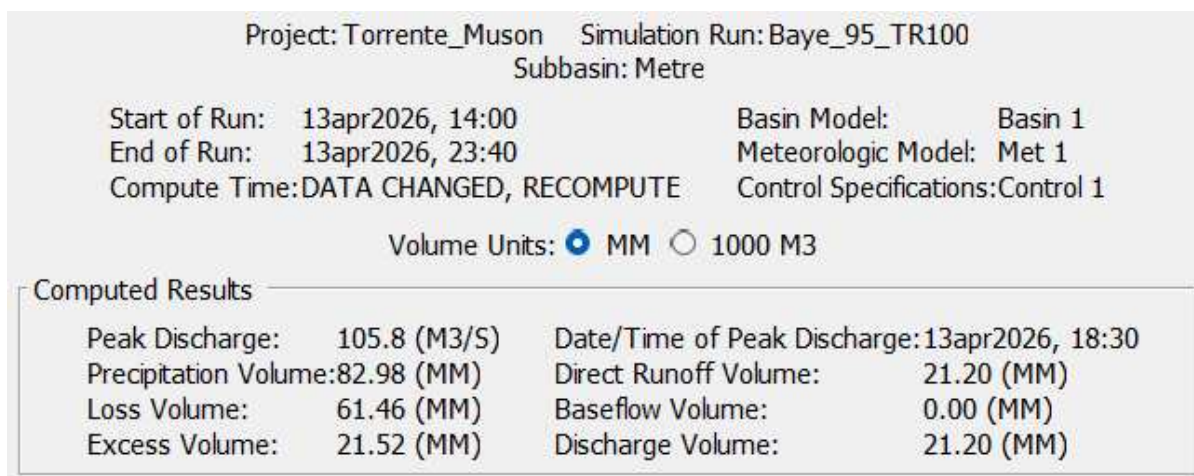


Figura 5.28 Risultati simulazione HEC-HMS

Nelle *figure 5.27 e 5.28* soprariportate si mostrano i risultati relativi al metodo bayesiano con parametro di posizione determinato con 95 percentile per il tempo di ritorno 100 anni.

Dalla simulazione si è ottenuto un valore di portata alla sezione di chiusura di 105.8 m³/s.

Confrontando i risultati ottenuti è possibile notare come emergano delle differenze tra i diversi valori.

In particolare, per il metodo della massima verosimiglianza per tempo di ritorno 50 anni, è stato ottenuto un valore di portata che supera di circa il 10% il corrispettivo valore determinato con metodo stazionario, mentre per tempo di ritorno 100 anni è stato ottenuto un valore che supera quello stazionario di circa l'8%.

Per quanto riguarda il metodo bayesiano invece, nel caso di parametro di posizione determinato tramite mediana, per il tempo di ritorno 50 anni è stato ottenuto un valore di portata che supera quello stazionario di circa il 15%, mentre per tempo di ritorno 100 anni, il valore stazionario viene superato del 14%.

Le differenze più marcate si riscontrano nel caso di parametro di posizione determinato tramite 95 percentile, dove per i tempi di ritorno di 50 e 100 anni si sono ottenuti valori che superano quelli stazionari rispettivamente di circa il 39% e il 38%.

Nel complesso, si nota come i metodi non stazionari abbiano condotto a valori di portata superiori rispetto ai metodi stazionari, con incrementi nei valori di portata via via superiori passando dal metodo MLE al metodo bayesiano in particolare, con parametro di posizione determinato con 95 percentile.

Questo mostra come il metodo non stazionario porti ad una maggiore amplificazione dei valori delle portate nella sezione di chiusura, risultando quindi maggiormente conservativo rispetto al modello stazionario.

6. CONCLUSIONI

Nel seguente lavoro si è svolta un'analisi delle precipitazioni estreme per quanto riguarda la regione Veneto, ponendo particolare attenzione al confronto tra metodo stazionario e non stazionario sia per la determinazione delle altezze di precipitazione che per la determinazione della portata alla sezione di chiusura nell'ambito di un caso pratico reale.

L'analisi, in prima battuta, ha riguardato un processo di ricostruzione dei dati mancanti, per le diverse stazioni considerate, tramite metodo IDWm, con successiva analisi statistica per la determinazione delle altezze di precipitazione tramite codice NEVA e applicazione al caso studio reale riguardante il progetto della vasca di laminazione sul torrente Muson.

Durante la determinazione delle altezze di precipitazione, l'approccio non stazionario, basato su metodo bayesiano, ha portato a risultati fortemente variabili e talvolta non coerenti da un punto di vista fisico, come valori molto elevati e comportamenti non monotoni delle curve di possibilità pluviometrica (CPP).

Al contrario, il metodo della massima verosimiglianza, ha fornito risultati coerenti, restituendo curve CPP prive di anomalie e fisicamente corrette.

Queste differenze sui valori delle altezze di precipitazione, si sono poi riflesse sulla determinazione delle portate alla sezione di chiusura tramite software HEC-HMS.

In particolare, il metodo MLE, rispetto al metodo stazionario, ha comportato un aumento dei valori di portata, per tempi di ritorno di 50 e 100 anni, più contenuti, compresi tra l'8% e 10%, mentre il metodo bayesiano ha portato a incrementi più significativi, arrivando fino al 38% (nel caso di parametro di posizione determinato tramite 95 percentile).

Questo evidenzia come, il metodo non stazionario, comporti una stima dei valori più conservativa delle portate di progetto.

In conclusione, il seguente lavoro ha mostrato come il metodo stazionario, nonostante sia più semplice e consolidato, possa condurre ad una sottostima delle altezze di precipitazione e di conseguenza anche delle portate nella sezione di chiusura, in particolare per tempi di ritorno elevati.

Al contrario, i metodi non stazionari, soprattutto nel contesto attuale influenzato dai possibili effetti dei cambiamenti climatici, che possono modificare la frequenza e l'intensità delle precipitazioni, risultano essere più conservativi, ma richiedono una maggiore attenzione nella scelta del metodo di stima.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Sito dell'agenzia regionale per la protezione dell'ambiente Veneto (A.R.P.A. Veneto). *Dati pluviografici e annali idrologici*.
- [2] Nebiyu Waliyi Tekesa. *Filling Missing Precipitation Methods and Approaches*. Università degli Studi di Pavia, 2025.
- [3] Gabriella Petaccia; Nebiyu Waliyi Tekesa; Giuseppe Barbero; Mario L.V. Martina. *Assessing the Role of Elevation in Estimating Missing Annual Maximum Rainfall: the Emilia-Romagna Case Study*. ASCE's Journal of Hydrologic Engineering, 2025.
- [4] Linying Cheng, Amir Aghakouchak, Erik Gilleland, Richard W Katz. *NEVA_ReferencePublication1*, 2014.
- [5] Linying Cheng, Amir Aghakouchak. *NEVA_ReferencePublication2*, 2014.
- [6] Ing. D. Rinaldo, Ing. A. Tucci. *Relazione Generale Progetto Definitivo Area Laminazione Muson*, Studi Rinaldo e CSP Engineering Consulting, 2014.
- [7] R. Biscaro. *Analisi del trend delle precipitazioni massime annue di diverse durate registrate nella regione Piemonte*.
Tesi di laurea magistrale, relatore: Prof. G. Barbero, Università degli Studi di Pavia, 2024/2025.