



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
CORSO DI STUDI IN RIASSETTO DEL TERRITORIO E
TUTELA DEL PAESAGGIO

SIMULAZIONE DI UN EVENTO DI PIENA IDRAULICA IN DUE BACINI MONTANI TRAMITE IL SOFTWARE HEC-HMS

Andreetta Luca
2067548
luca.andreetta.1@studenti.unipd.it

Anno accademico 2024 / 2025

RELAZIONE TECNICA DEL CORSO DI CLIMATE CHANGES
AND HYDROGEOLOGICAL HAZARD MITIGATION

Indice

1	Introduzione	3
2	Generalità sui bacini e sull'evento pluviometrico di studio	3
3	Analisi dei dati	4
3.1	POT	4
3.2	Analisi preliminare di elaborazione dati	5
3.3	Plotting position	5
3.4	Valutazione visiva dell'accoppiamento	6
3.5	Altezza critica di precipitazione	6
3.6	LSPP	6
3.7	Calcolo del tempo di corrivazione	6
4	Risultati dell'analisi statistico-probabilistica	7
4.1	Tempo di pioggia di 15 minuti	7
4.2	Tempo di pioggia di 30 minuti	8
4.3	Tempo di pioggia di 45 minuti	10
4.4	Tempo di pioggia di 60 minuti	11
4.5	Tempo di pioggia di 120 minuti	13
4.6	Tempo di pioggia di 180 minuti	14
4.7	Tempo di pioggia di 360 minuti	16
4.8	Tempo di pioggia di 720 minuti	17
4.9	Tempo di pioggia di 1440 minuti	19
4.10	Altezze critiche e LSPP	20
5	Nozioni generali sull'utilizzo di HEC-HMS	21
5.1	Metodo CN-SCS	21
5.2	Time Lag	22
5.3	Coefficiente di Nash-Sutcliffe	22
6	Procedimento su HEC-HMS	22
6.1	Creare e calibrare il modello idrologico	23
6.2	Applicazione del modello idrologico al proprio tempo di ritorno	27
6.3	Analisi dei risultati ottenuti	32
7	Conclusioni	32
	Bibliografia	33

1 Introduzione

L'aumento della frequenza di eventi estremi pluviometrici, causati dal cambiamento climatico, porta con sè la necessità per gli amministratori del territorio a comprendere maggiormente le risposte idrauliche delle aree a maggior rischio.

Per tale motivo, alle formule teoriche di studio dei deflussi vengono affiancati i modelli digitali di analisi idraulica. In tali strumenti, a fini di studio, possono essere introdotti valori fisici reali oppure previsionali degli eventi atmosferici.

In questa relazione si andrà ad esporre i procedimenti necessari per svolgere l'analisi di risposta idraulica di due bacini montani, mediante l'analisi statistico-probabilistica delle piogge e l'utilizzo di un software di modellazione idrologica (HEC-HMS).

La prima parte della relazione interesserà l'analisi statistico-probabilistica delle serie storiche pluviometriche, in modo da ottenere la corretta curva LSPP per un dato tempo di ritorno (215 anni).

Successivamente, utilizzando i dati di pioggia e di deflusso misurati durante l'evento Vaia, sarà possibile creare ed ottimizzare il modello idrologico dei due bacini di studio.

Infine, dal risultato dell'analisi statistico-probabilistica, si riuscirà ad ottenere le risposte di deflusso dei bacini, a fronte di una qualsiasi precipitazione con un dato tempo di ritorno.

Essendo una relazione tecnica, si andrà ad esporre ed elencare solamente le procedure svolte per l'analisi idrografica, considerando che il lettore abbia una conoscenza basilare di utilizzo del programma HEC-HMS.

2 Generalità sui bacini e sull'evento pluviometrico di studio

Con bacino idrografico si intende tutta la superficie, definito un punto (sezione di chiusura), da cui proviene l'acqua di deflusso e che la attraversa. Infatti, al fine dello studio idrologico di una qualsiasi area, la conoscenza del bacino idrografico permette di conoscere la superficie di terreno da cui viene generato il runoff, e che è possibile quantificare alla sezione di chiusura. Generalmente, al fine di quantificare il deflusso, si considera il bacino delimitato dalle caratteristiche orografiche del terreno; nel caso in cui si dovesse prendere in considerazione anche la litologia del suolo, l'area prende il nome di "bacino topografico".

Il volume di acqua che cade a terra, per arrivare alla sezione di chiusura, deve muoversi nel dominio di versante (ovvero nel soprassuolo) e nel dominio del reticolo idrografico. Come verrà ripetuto successivamente, la velocità di movimento in acqua, che è superiore a quella che si manifesta nel versante, quantifica maggiormente il tempo necessario alla goccia d'acqua che cade al suolo di arrivare alla sezione di chiusura.

I bacini montani interessati dallo studio di questa relazione sono due classici esempi di unità geomorfologiche montane.

Infatti, riguardano rispettivamente i bacini idrogeologici dei fiumi Boite [1] e Piave [2], posti nel territorio bellunese.

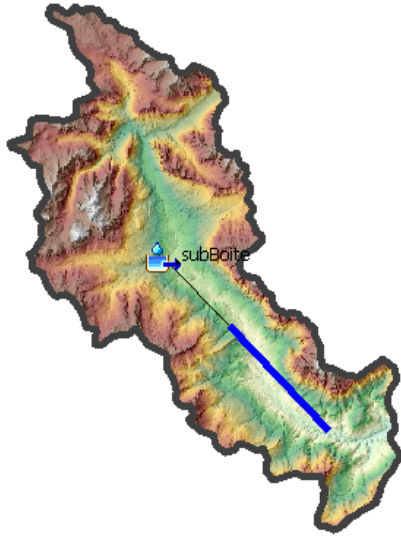


Figura 1: Bacino idrografico del Boite.

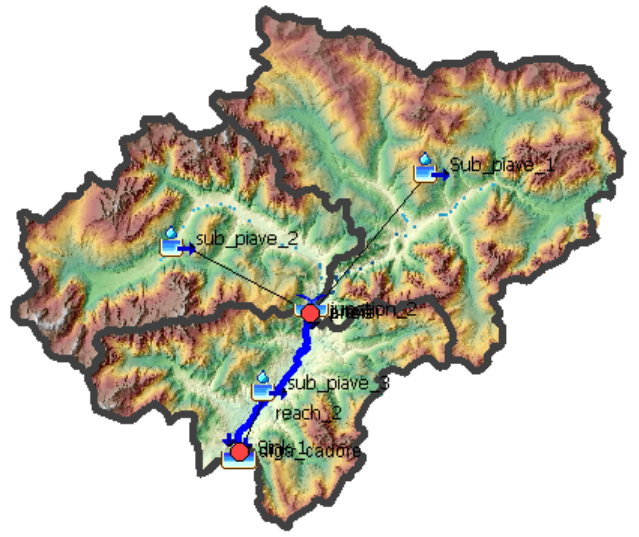


Figura 2: Bacino idrografico del Piave.

Al fine di svolgere in modo più corretto la procedura di analisi spaziale (come verrà descritta successivamente), si è scelto di suddividere il territorio del bacino del Piave in ulteriori tre sottobacini.

Il bacino del fiume Boite ha un'estensione di 383 km^2 , mentre il bacino del Piave ha un'estensione totale di 813 km^2 .

Come verrà ricordato anche successivamente, ai fini della modellazione idraulica è doveroso far presente che all'interno del bacino del Piave sono presenti una serie di invasi artificiali, in grado di modificare l'andamento del deflusso alla sezione di chiusura.

3 Analisi dei dati

In questa sezione si andrà ad esporre la procedura di analisi di una qualsiasi serie pluviometrica. Per semplificare la lettura della relazione, i risultati numerici verranno riportati nei capitoli successivi.

Mediante l'elaborazione dei dati pluviometrici è possibile mettere in relazione l'entità degli eventi estremi e la loro probabilità di accadimento, che in ogni caso è in relazione inversamente proporzionale. Questo processo, successivamente, permetterà di estrarre dal campione di dati (riferiti ad alcuni anni), la LSPP (Linea Segnalatrice di Probabilità Pluviometrica).

Per questa relazione, i dati pluviometrici ci sono stati forniti dal Professore, pur essendo di un'area diversa da quella di studio.

3.1 POT

Generalmente, il campione della serie è formato dai massimi annuali di precipitazione di tutta la popolazione.

In questo caso invece, i valori verranno estratti secondo il metodo dei *Peak over Threshold* (Picchi superiori al limite, POT): fissata una soglia inferiore, si andrà a considerare solamente i valori uguali o superiori ad essa.

Matematicamente, il metodo POT viene descritto così:

$$P(Y_{\max} < x) = \sum_{n=1}^{\infty} p(n) F(x)^n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{\xi}{\psi} (x - s) \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\}^n \quad (1)$$

All'interno dell'equazione 1 sono presenti due formule di distribuzione:

- Distribuzione di Poisson: rappresenta la distribuzione di probabilità discreta dell'evento di studio;
- Distribuzione generalizzata di Pareto: rappresenta la distribuzione dei valori eccedenti alla soglia di riferimento posta.

Il parametro di soglia (s) viene posto a discrezione da chi esegue i calcoli; generalmente, il numero di valori da isolare dovrebbe coincidere con il numero di anni della serie.

Il parametro ξ si ricava dalla formula:

$$\xi = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\mu - s}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Il valore di ψ si calcola mediante la formula:

$$\psi = \sigma(1 - \xi)\sqrt{(1 - 2 \cdot \xi)} \quad (3)$$

Il parametro λ si ricava dal rapporto tra il numero di valori considerati e gli anni della serie:

$$\lambda = \frac{n}{N} \quad (4)$$

Infine, la probabilità di superamento dell'evento F_{x_i} si ricava dalla distribuzione generalizzata di Pareto (GPD):

$$F_{x_i} = 1 - \left[1 + \xi \left(\frac{x_i - s}{\psi} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \quad (5)$$

Il vantaggio di questo metodo, rispetto a quello che interessa solamente i singoli massimi annui, è che il campione risultante considera anche gli eventi di entità minori.

3.2 Analisi preliminare di elaborazione dati

Per poter estrarre l'altezza critica di precipitazione, data una serie pluviometrica, è necessario svolgere alcune procedure preliminari sulla popolazione:

- ordinare in ordine decrescente i valori di precipitazione;
- fissare una soglia inferiore di riferimento;
- eliminare i valori di precipitazione minori, solamente nel caso in cui ce ne fossero alcuni dipendenti da altri;
- procedere con l'elaborazione statistica.

3.3 Plotting position

Mediante la plotting position è possibile verificare la bontà della distribuzione dei valori.

Ad ogni valore della serie, posta in ordine crescente, viene attribuito un valore dipendente alla sua posizione numerica, tramite la formula:

$$P = \frac{i}{n + 1} \quad (6)$$

Questo parametro indica la possibilità di non superamento dell'evento, che sarà sempre maggiore all'aumentare della posizione nella serie.

3.4 Valutazione visiva dell'accoppiamento

Avendo calcolato la plotting position per ogni valore della serie, è possibile associare la relativa probabilità di non superamento dell'evento, attraverso la formula 5.

Infine, per effettuare la valutazione visiva della bontà di accoppiamento, è necessario creare un grafico dove in ascissa viene posta la plotting position ed in ordinata la probabilità di non superamento dell'evento.

3.5 Altezza critica di precipitazione

Dopo aver processato i dati del campione statistico ed aver valutato la bontà di accoppiamento con la serie teorica, è possibile calcolare la relativa altezza critica di precipitazione (dato un certo tempo di ritorno), mediante la formula:

$$h_{T_R} = s + \frac{\psi}{\xi} \left[\left(\frac{1}{\lambda \cdot T_R} \right)^{-\xi} - 1 \right] \quad (7)$$

3.6 LSPP

La Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica è una funzione che mette in relazione la durata di un certo evento pluviometrico e l'altezza di pioggia prevista, per un dato tempo di ritorno.

Quindi è possibile, svolgendo i calcoli per diversi tempi di ritorno, avere diverse LSPP per una stessa stazione di rilevamento (o per uno stesso sito).

Al fine di semplificare la lettura del grafico, ed eventualmente l'estrapolazione del dato di pioggia, è possibile imporre che gli assi cartesiani abbiano la scala logaritmica; in questo modo, la linea curva interpolatrice dei punti diventa una retta.

La traiettoria della linea segue l'andamento della funzione $h = at^n$, dove:

- t è il parametro della durata dell'evento (espresso in ore);
- a dipende dal tempo di ritorno;
- n è un valore compreso tra 0 e 1, ed è praticamente costante per una data stazione.

3.7 Calcolo del tempo di corrivazione

Il tempo di corrivazione t_c di un bacino è il periodo necessario affinché una qualsiasi massa d'acqua percorra lo spazio tra la sezione di chiusura ed il punto più idraulicamente distante ad essa.

Questo tempo può anche essere visto come il periodo di pioggia necessario affinché ogni area del bacino sia contribuente al deflusso alla sezione di chiusura.

Questo parametro è molto importante in idrologia, perché alla durata di precipitazione uguale a quella di corrivazione avviene il massimo deflusso. Se la precipitazione avesse un tempo inferiore, non tutto il bacino sarebbe contribuente al medesimo istante; se la durata di pioggia fosse superiore a quella di corrivazione, l'intensità sarebbe minore.

Esistono diverse formule per calcolare il t_c di un bacino, in questa relazione ho scelto di usare quella di Ferro (del 2002):

$$T_c = 0.675 \cdot \sqrt{A} \quad (8)$$

Nella formula occorre introdurre il valore di estensione in chilometri quadri, al fine di ottenere il tempo in ore.

Svolgendo la formula, si ottiene che il tempo di corrivazione per il bacino del Boite è pari a 13.21 h, e quello del Piave è pari a 19.24 h.

4 Risultati dell'analisi statistico-probabilistica

4.1 Tempo di pioggia di 15 minuti

Tabella 1: Campione della serie pluviometrica.

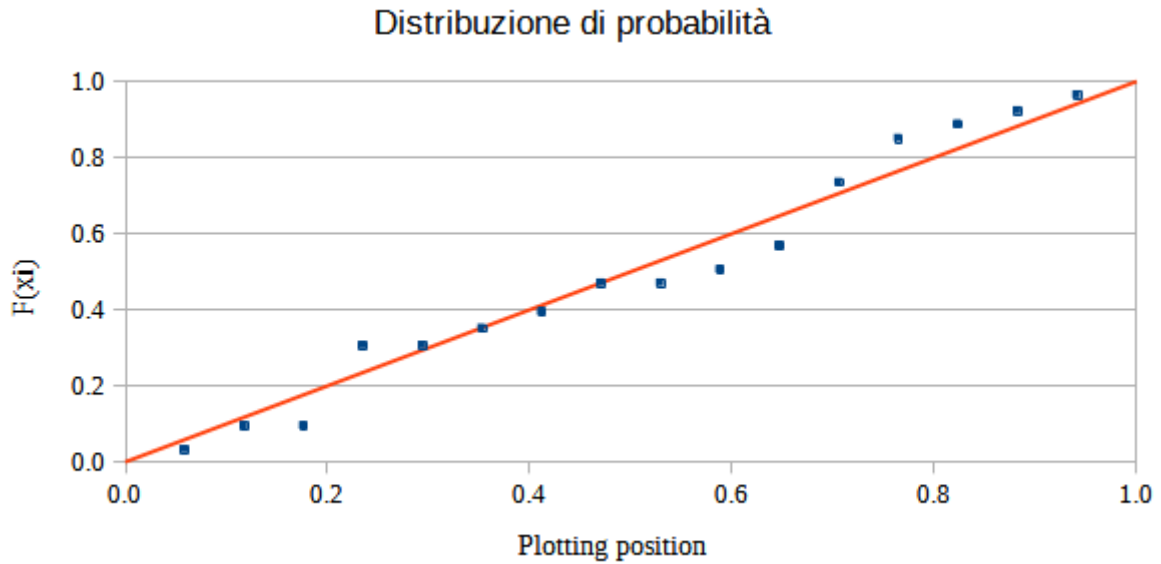
	dd-mm-yy	hh:mm:ss	mm
1	05/09/2008	03:00:00	25
2	24/09/2012	14:15:00	23
3	29/08/2020	17:45:00	22
4	11/07/2017	14:45:00	21.2
5	15/10/2019	15:00:00	19.6
6	09/08/2015	13:00:00	18.2
7	25/06/2014	07:30:00	17.8
8	20/10/2013	19:15:00	17.6
9	15/09/2014	16:00:00	17.6
10	10/08/2006	15:45:00	17.2
11	26/07/2006	11:15:00	17
12	03/08/2006	16:15:00	16.8
13	28/10/2018	12:15:00	16.8
14	09/08/2009	15:00:00	16
15	26/08/2012	04:00:00	16
16	15/06/2020	12:00:00	15.8

Tabella 2: Parametri della serie pluviometrica.

n	16
N	17 anni
soglia	15.7
\bar{x}	18.6
σ	2.7665
ξ	-0.0494
ψ	3.0434
λ	0.9412

Tabella 3: Valori di distribuzione della serie di precipitazione della durata di 15 min.

	mm	plotting	F(xi)
1	15.8	0.0588	0.0324
2	16	0.1176	0.0941
3	16	0.1765	0.0941
4	16.8	0.2353	0.3056
5	16.8	0.2941	0.3056
6	17	0.3529	0.3506
7	17.2	0.4118	0.3929
8	17.6	0.4706	0.4696
9	17.6	0.5294	0.4696
10	17.8	0.5882	0.5044
11	18.2	0.6471	0.5677
12	19.6	0.7059	0.7339
13	21.2	0.7647	0.8494
14	22	0.8235	0.8874
15	23	0.8824	0.9222
16	25	0.9412	0.9636



4.2 Tempo di pioggia di 30 minuti

Tabella 4: Campione della serie pluviometrica.

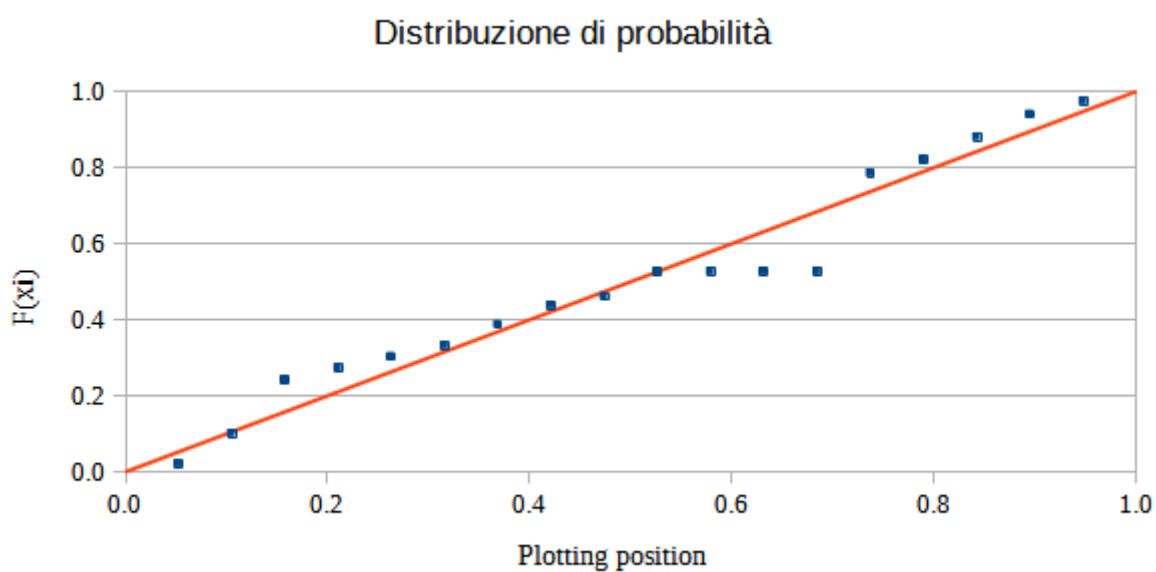
	dd-mm-yy	hh:mm:ss	mm
1	29/08/2020	17:45:00	39.8
2	05/09/2008	03:15:00	36.2
3	09/08/2015	13:00:00	33.2
4	10/08/2006	15:45:00	31.4
5	20/10/2013	19:30:00	30.6
6	03/08/2006	16:15:00	27
7	29/06/2014	19:45:00	27
8	15/06/2020	12:15:00	27
9	26/09/2021	11:00:00	27
10	15/09/2022	13:45:00	26.4
11	24/09/2012	14:30:00	26.2
12	28/10/2018	12:15:00	25.8
13	15/10/2019	15:15:00	25.4
14	15/09/2014	16:15:00	25.2
15	16/09/2021	07:45:00	25
16	16/09/2021	17:15:00	24.8
17	03/08/2020	14:00:00	24
18	25/07/2012	12:45:00	23.6

Tabella 5: Parametri della serie pluviometrica.

n	18
N	17 anni
soglia	23.5
\bar{x}	28.0889
σ	4.4427
ξ	-0.0334
ψ	4.7424
λ	1.0588

Tabella 6: Valori di distribuzione della serie di precipitazione della durata di 30 min.

	mm	Plotting	F(xi)
1	23.6	0.0526	0.0209
2	24	0.1053	0.1002
3	24.8	0.1579	0.2407
4	25	0.2105	0.2724
5	25.2	0.2632	0.3028
6	25.4	0.3158	0.3319
7	25.8	0.3684	0.3867
8	26.2	0.4211	0.4372
9	26.4	0.4737	0.4609
10	27	0.5263	0.5264
11	27	0.5789	0.5264
12	27	0.6316	0.5264
13	27	0.6842	0.5264
14	30.6	0.7368	0.7847
15	31.4	0.7895	0.8199
16	33.2	0.8421	0.8798
17	36.2	0.8947	0.9395
18	39.8	0.9474	0.9740



4.3 Tempo di pioggia di 45 minuti

Tabella 7: Campione della serie pluviometrica.

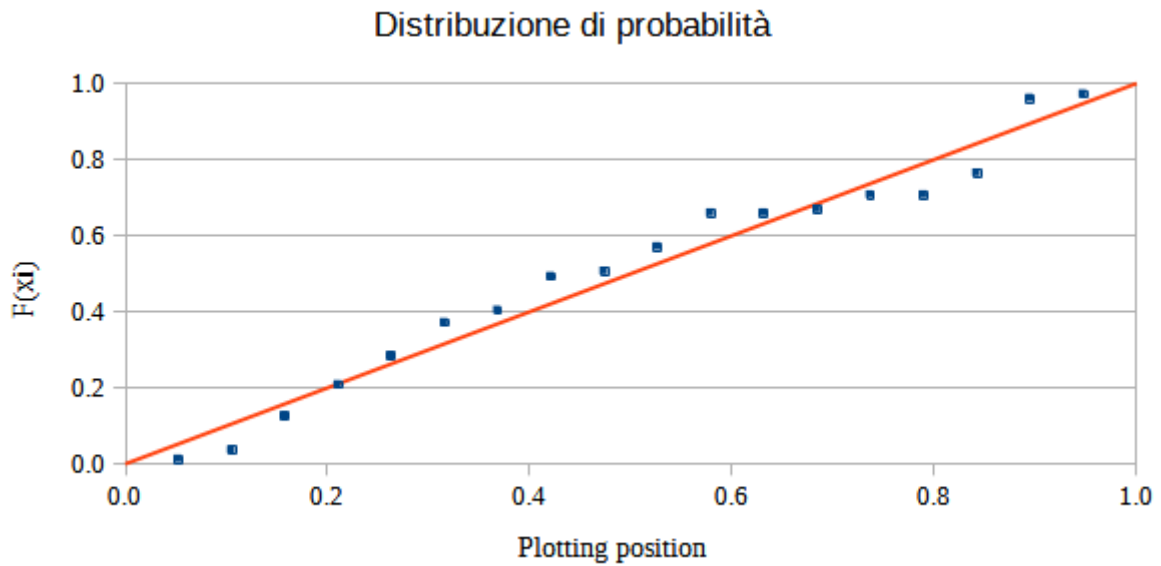
	dd-mm-yy	hh:mm:ss	mm
1	20/10/2013	19:45:00	48
2	29/08/2020	17:45:00	46.6
3	05/09/2008	03:30:00	37.2
4	29/06/2014	20:00:00	35.8
5	16/09/2021	17:15:00	35.8
6	26/09/2021	11:15:00	35
7	10/08/2006	16:00:00	34.8
8	09/08/2015	13:15:00	34.8
9	15/09/2022	13:45:00	33.2
10	28/10/2018	12:15:00	32.2
11	03/08/2006	16:30:00	32
12	10/11/2012	22:15:00	30.8
13	15/10/2019	15:15:00	30.4
14	17/09/2018	15:00:00	29.4
15	24/09/2012	14:30:00	28.6
16	15/06/2020	12:30:00	27.8
17	26/08/2012	04:30:00	27
18	25/07/2012	13:00:00	26.8

Tabella 8: Parametri della serie pluviometrica.

n	18
N	17 anni
soglia	26.7
\bar{x}	33.6778
σ	5.9040
ξ	-0.1984
ψ	8.3623
λ	1.0588

Tabella 9: Valori di distribuzione della serie di precipitazione della durata di 45 min.

	mm	plotting	F(xi)
1	26.8	0.0526	0.0119
2	27	0.1053	0.0354
3	27.8	0.1579	0.1248
4	28.6	0.2105	0.2074
5	29.4	0.2632	0.2837
6	30.4	0.3158	0.3707
7	30.8	0.3684	0.4030
8	32	0.4211	0.4920
9	32.2	0.4737	0.5058
10	33.2	0.5263	0.5701
11	34.8	0.5789	0.6589
12	34.8	0.6316	0.6589
13	35	0.6842	0.6689
14	35.8	0.7368	0.7065
15	35.8	0.7895	0.7065
16	37.2	0.8421	0.7640
17	46.6	0.8947	0.9601
18	48	0.9474	0.9712



4.4 Tempo di pioggia di 60 minuti

Tabella 10: **Campione della serie pluviometrica.**

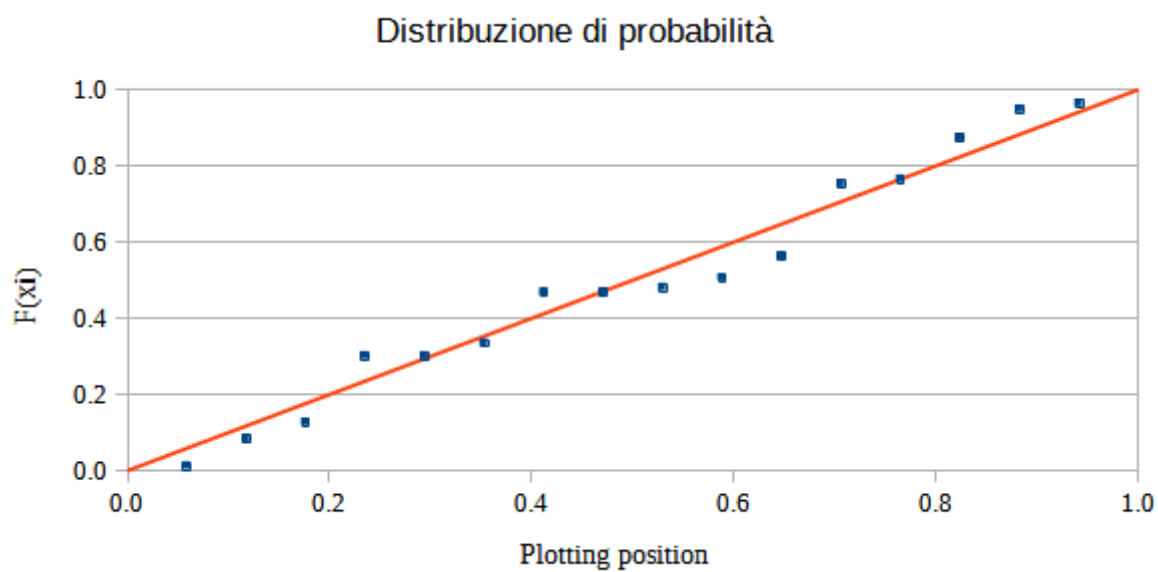
	dd-mm-yy	hh:mm:ss	mm
1	20/10/2013	19:45:00	59.4
2	29/08/2020	17:45:00	56.6
3	16/09/2021	17:15:00	49.4
4	29/06/2014	20:00:00	44.4
5	05/09/2008	03:45:00	44
6	26/09/2021	11:30:00	39.4
7	03/08/2006	16:45:00	38.4
8	28/10/2018	12:30:00	38
9	10/11/2012	22:15:00	37.8
10	15/09/2022	13:45:00	37.8
11	10/08/2006	16:15:00	36
12	09/08/2015	13:30:00	35.6
13	03/08/2020	14:30:00	35.6
14	16/09/2021	08:15:00	33.8
15	26/08/2012	04:45:00	33.4
16	15/10/2019	15:30:00	32.8

Tabella 11: **Parametri della serie pluviometrica.**

n	16
N	17 anni
soglia	32.7
\bar{x}	40.7750
σ	8.0465
ξ	-0.0035
ψ	8.1037
λ	0.9412

Tabella 12: Valori di distribuzione della serie di precipitazione della durata di 60 min.

	mm	plotting	F(xi)
1	32.8	0.0588	0.0123
2	33.4	0.1176	0.0828
3	33.8	0.1765	0.1270
4	35.6	0.2353	0.3010
5	35.6	0.2941	0.3010
6	36	0.3529	0.3347
7	37.8	0.4118	0.4674
8	37.8	0.4706	0.4674
9	38	0.5294	0.4804
10	38.4	0.5882	0.5055
11	39.4	0.6471	0.5631
12	44	0.7059	0.7529
13	44.4	0.7647	0.7648
14	49.4	0.8235	0.8736
15	56.6	0.8824	0.9484
16	59.4	0.9412	0.9636



4.5 Tempo di pioggia di 120 minuti

Tabella 13: Campione della serie pluviometrica.

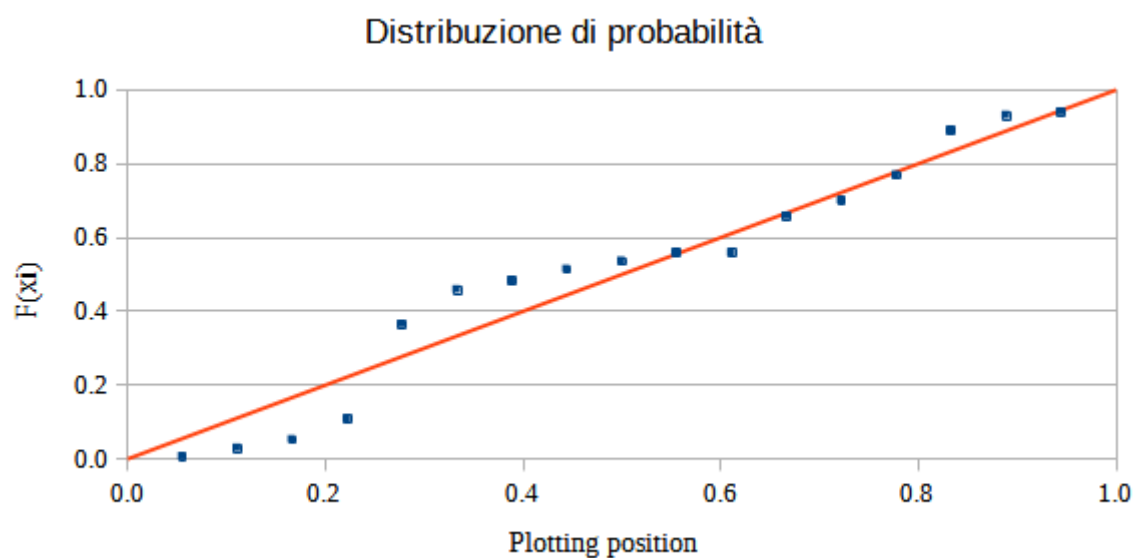
	dd-mm-yy	hh:mm:ss	mm
1	20/10/2013	20:30:00	68.6
2	29/08/2020	18:00:00	67.8
3	16/09/2021	17:30:00	64.8
4	28/10/2018	12:30:00	58.8
5	10/11/2012	22:30:00	56.2
6	03/08/2006	17:45:00	54.8
7	05/09/2008	03:15:00	51.8
8	26/08/2012	05:30:00	51.8
9	05/11/2014	07:00:00	51.2
10	26/09/2021	11:30:00	50.6
11	15/09/2022	13:45:00	49.8
12	03/08/2020	14:30:00	49.2
13	29/06/2014	20:15:00	47
14	11/12/2017	23:45:00	41.8
15	20/09/2014	04:15:00	40.8
16	25/06/2014	09:15:00	40.4
17	09/02/2016	21:15:00	40

Tabella 14: Parametri della serie pluviometrica.

n	17
N	17 anni
soglia	39.9
\bar{x}	52.0824
σ	9.0452
ξ	-0.4070
ψ	17.1403
λ	1.0000

Tabella 15: Valori di distribuzione della serie di precipitazione della durata di 120 min.

	mm	plotting	F(xi)
1	40	0.0556	0.0058
2	40.4	0.1111	0.0289
3	40.8	0.1667	0.0517
4	41.8	0.2222	0.1072
5	47	0.2778	0.3647
6	49.2	0.3333	0.4583
7	49.8	0.3889	0.4823
8	50.6	0.4444	0.5134
9	51.2	0.5000	0.5359
10	51.8	0.5556	0.5578
11	51.8	0.6111	0.5578
12	54.8	0.6667	0.6580
13	56.2	0.7222	0.6996
14	58.8	0.7778	0.7686
15	64.8	0.8333	0.8890
16	67.8	0.8889	0.9307
17	68.6	0.9444	0.9398



4.6 Tempo di pioggia di 180 minuti

Tabella 16: **Campione della serie pluviometrica.**

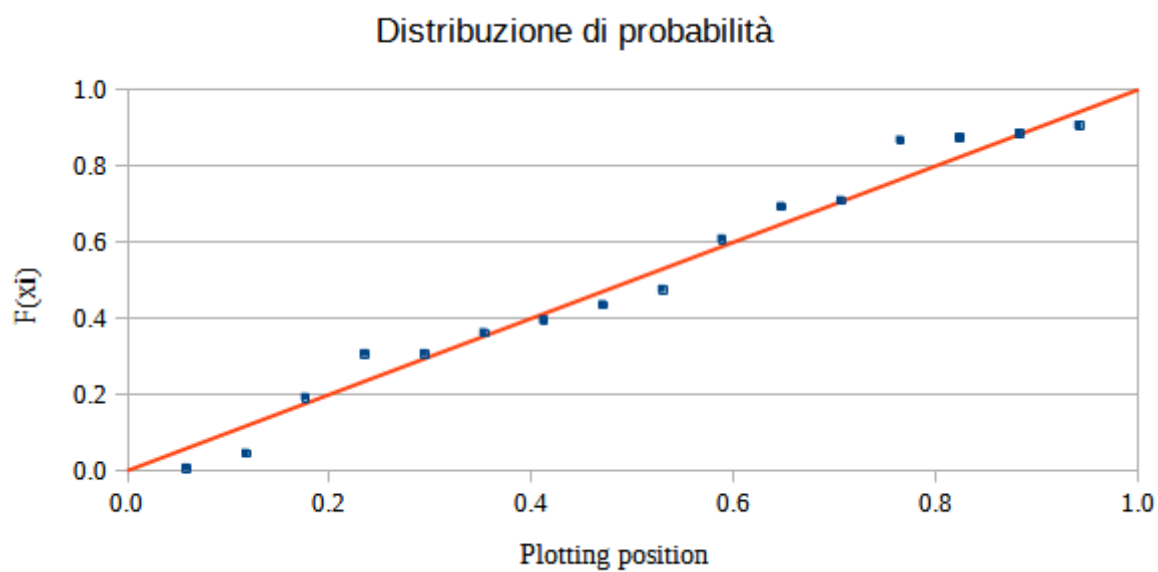
	dd-mm-yy	hh:mm:ss	mm
1	16/09/2021	18:15:00	73.8
2	29/08/2020	19:15:00	73
3	20/10/2013	20:45:00	72.6
4	28/10/2018	12:15:00	72.4
5	03/08/2020	14:30:00	67.8
6	05/11/2014	07:00:00	67.4
7	10/11/2012	23:00:00	65.4
8	03/08/2006	18:45:00	62.6
9	26/09/2021	12:30:00	61.8
10	15/09/2022	13:45:00	61
11	05/09/2008	04:00:00	60.4
12	20/09/2014	04:15:00	59.4
13	12/12/2017	01:00:00	59.4
14	09/02/2016	21:45:00	57.4
15	20/01/2009	10:00:00	55
16	26/08/2012	06:30:00	54.4

Tabella 17: **Parametri della serie pluviometrica.**

n	16
N	17 anni
soglia	54.3
\bar{x}	63.9875
σ	6.5183
ξ	-0.6044
ψ	15.5427
λ	0.9412

Tabella 18: Valori di distribuzione della serie di precipitazione della durata di 180 min.

	mm	plotting	F(xi)
1	54.4	0.0588	0.0064
2	55	0.1176	0.0446
3	57.4	0.1765	0.1915
4	59.4	0.2353	0.3063
5	59.4	0.2941	0.3063
6	60.4	0.3529	0.3611
7	61	0.4118	0.3931
8	61.8	0.4706	0.4348
9	62.6	0.5294	0.4752
10	65.4	0.5882	0.6073
11	67.4	0.6471	0.6922
12	67.8	0.7059	0.7082
13	72.4	0.7647	0.8665
14	72.6	0.8235	0.8722
15	73	0.8824	0.8834
16	73.8	0.9412	0.9046



4.7 Tempo di pioggia di 360 minuti

Tabella 19: Campione della serie pluviometrica.

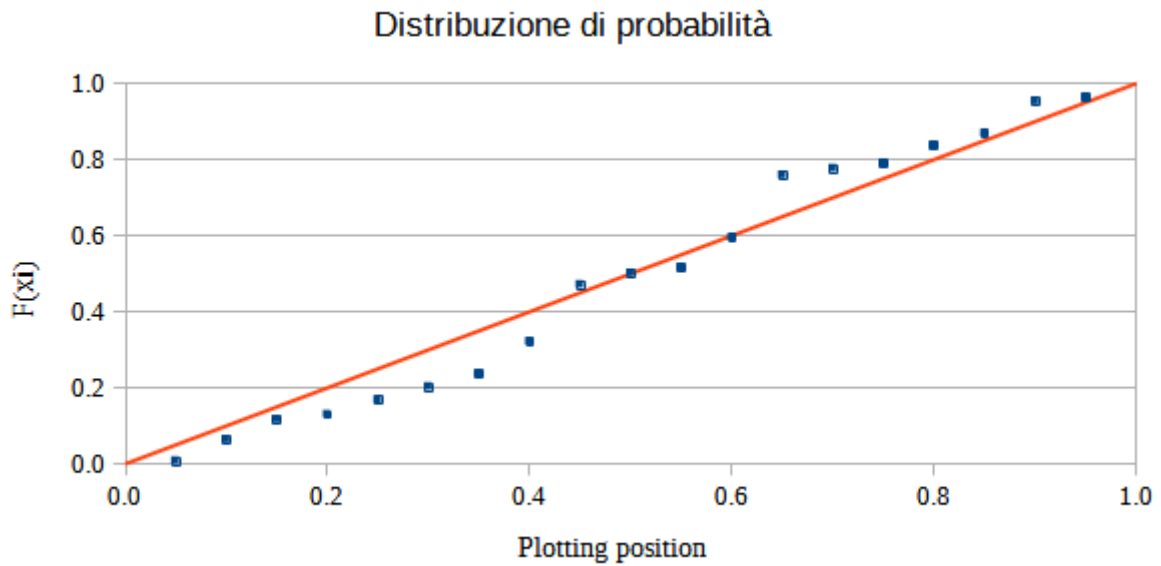
	dd-mm-yy	hh:mm:ss	mm
1	05/11/2014	07:45:00	119.6
2	16/09/2021	18:30:00	116.8
3	20/01/2009	12:45:00	103.2
4	11/11/2012	02:45:00	100.4
5	01/02/2019	21:30:00	97
6	09/02/2016	22:15:00	96.2
7	12/12/2017	00:15:00	95.2
8	28/10/2018	14:30:00	88.2
9	26/09/2021	15:30:00	85.8
10	23/12/2009	02:15:00	85.4
11	05/12/2008	06:15:00	84.6
12	18/03/2013	12:30:00	81.2
13	15/09/2022	15:15:00	79.6
14	10/12/2017	23:45:00	79
15	05/03/2006	11:00:00	78.4
16	04/01/2014	18:15:00	77.8
17	29/08/2020	19:45:00	77.6
18	20/10/2013	21:15:00	76.8
19	02/03/2020	17:30:00	76

Tabella 20: Parametri della serie pluviometrica.

n	19
N	17 anni
soglia	75.9
\bar{x}	89.4105
σ	13.2704
ξ	-0.0183
ψ	13.7572
λ	1.1176

Tabella 21: Valori di distribuzione della serie di precipitazione della durata di 360 min.

	mm	plotting	F(xi)
1	76	0.0500	0.0072
2	76.8	0.1000	0.0634
3	77.6	0.1500	0.1164
4	77.8	0.2000	0.1291
5	78.4	0.2500	0.1664
6	79	0.3000	0.2021
7	79.6	0.3500	0.2363
8	81.2	0.4000	0.3206
9	84.6	0.4500	0.4706
10	85.4	0.5000	0.5009
11	85.8	0.5500	0.5154
12	88.2	0.6000	0.5940
13	95.2	0.6500	0.7586
14	96.2	0.7000	0.7759
15	97	0.7500	0.7889
16	100.4	0.8000	0.8364
17	103.2	0.8500	0.8675
18	116.8	0.9000	0.9530
19	119.6	0.9500	0.9621



4.8 Tempo di pioggia di 720 minuti

Tabella 22: **Campione della serie pluviometrica.**

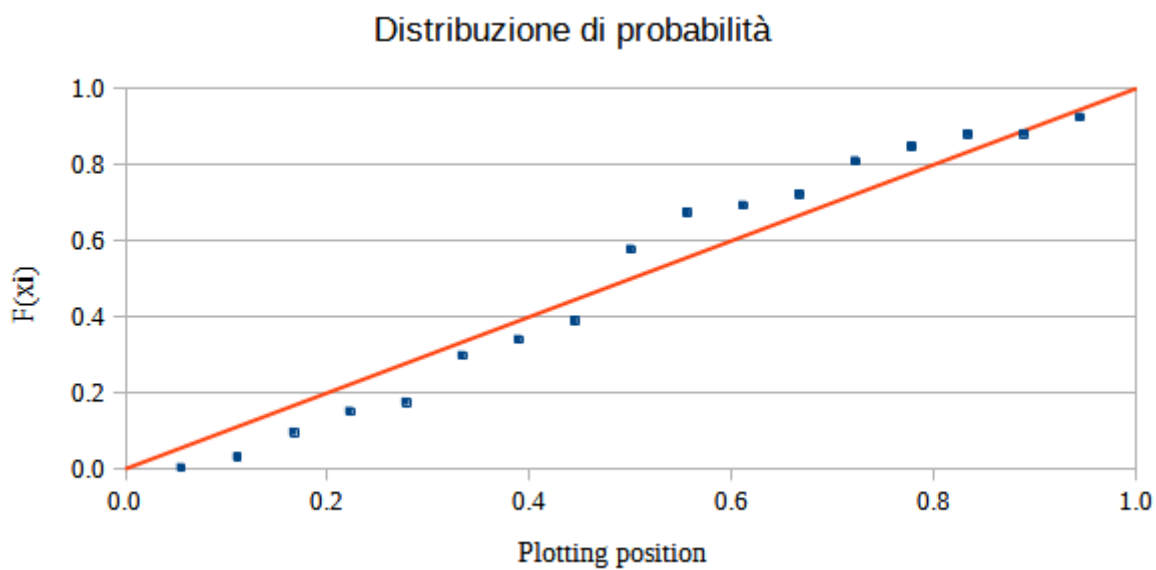
	dd-mm-yy	hh:mm:ss	mm
1	12/12/2017	01:30:00	183
2	02/02/2019	01:45:00	173.2
3	20/01/2009	13:30:00	173
4	16/09/2021	17:45:00	167.2
5	05/12/2008	11:15:00	161.6
6	05/11/2014	12:45:00	151
7	11/11/2012	07:15:00	148
8	28/10/2018	13:15:00	146.2
9	25/12/2009	01:15:00	137.8
10	21/12/2019	00:30:00	124.7
11	04/01/2014	22:30:00	121.8
12	23/12/2009	02:45:00	119.4
13	10/02/2016	01:30:00	113
14	08/12/2017	14:15:00	111.8
15	11/01/2016	13:45:00	109.2
16	18/03/2013	16:45:00	106.2
17	25/10/2011	23:00:00	105

Tabella 23: **Parametri della serie pluviometrica.**

n	17
N	17 anni
soglia	104.9
\bar{x}	138.3588
σ	26.5273
ξ	-0.2954
ψ	43.3438
λ	1.0000

Tabella 24: Valori di distribuzione della serie di precipitazione della durata di 720 min.

	mm	plotting	F(xi)
1	105	0.0556	0.0023
2	106.2	0.1111	0.0297
3	109.2	0.1667	0.0958
4	111.8	0.2222	0.1505
5	113	0.2778	0.1749
6	119.4	0.3333	0.2969
7	121.8	0.3889	0.3392
8	124.7	0.4444	0.3878
9	137.8	0.5000	0.5766
10	146.2	0.5556	0.6734
11	148	0.6111	0.6919
12	151	0.6667	0.7211
13	161.6	0.7222	0.8086
14	167.2	0.7778	0.8460
15	173	0.8333	0.8790
16	173.2	0.8889	0.8800
17	183	0.9444	0.9237



4.9 Tempo di pioggia di 1440 minuti

Tabella 25: Campione della serie pluviometrica.

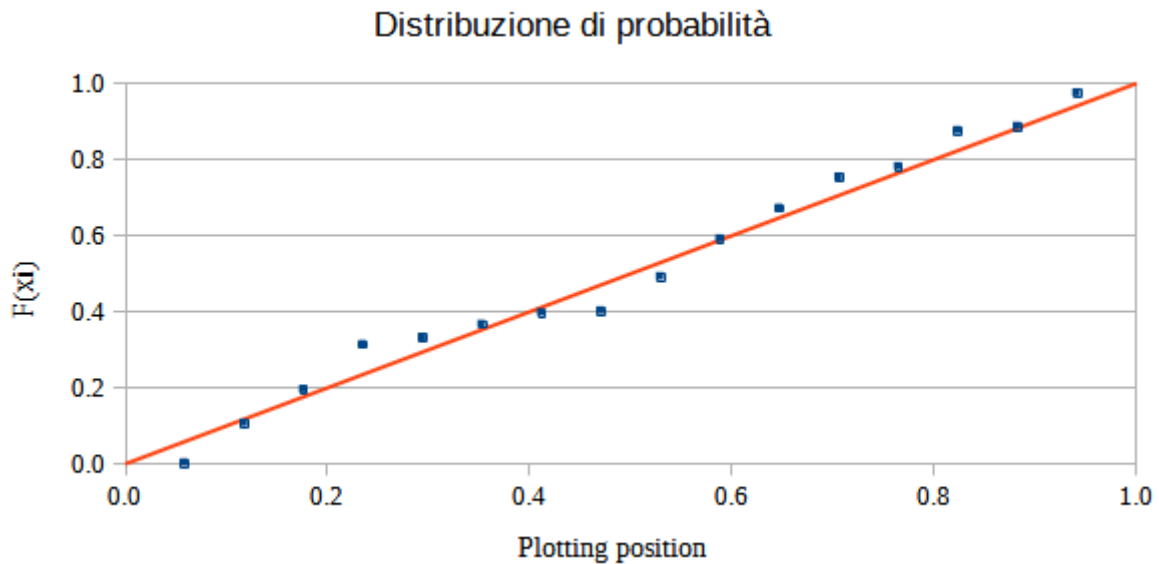
	dd-mm-yy	hh:mm:ss	mm
1	12/12/2017	01:00:00	311.2
2	20/01/2009	15:15:00	250.4
3	02/02/2019	06:45:00	246.4
4	05/12/2008	17:00:00	220.4
5	21/12/2019	10:00:00	214.7
6	06/11/2014	00:15:00	200.8
7	17/09/2021	04:00:00	190.2
8	25/12/2009	10:15:00	179.2
9	11/11/2012	13:15:00	170.4
10	05/01/2014	08:00:00	167.8
11	23/12/2009	02:45:00	165
12	08/12/2017	19:30:00	163.6
13	22/01/2021	23:00:00	163
14	28/10/2018	16:45:00	155.2
15	05/12/2020	13:00:00	149.6
16	17/01/2014	22:30:00	143.6

Tabella 26: Parametri della serie pluviometrica.

n	16
N	17 anni
soglia	143.5
\bar{x}	193.2188
σ	45.4932
ξ	-0.0972
ψ	54.5512
λ	0.9412

Tabella 27: Valori di distribuzione della serie di precipitazione della durata di 1440 min.

	mm	plotting	F(xi)
1	143.6	0.0588	0.0018
2	149.6	0.1176	0.1063
3	155.2	0.1765	0.1949
4	163.6	0.2353	0.3129
5	165	0.2941	0.3309
6	167.8	0.3529	0.3658
7	170.4	0.4118	0.3967
8	170.8	0.4706	0.4013
9	179.2	0.5294	0.4914
10	190.2	0.5882	0.5909
11	201	0.6471	0.6711
12	214.7	0.7059	0.7523
13	220.4	0.7647	0.7804
14	246.4	0.8235	0.8755
15	250.4	0.8824	0.8863
16	311.2	0.9412	0.9741



4.10 Altezze critiche e LSPP

Successivamente ad aver valutato la bontà di accoppiamento degli eventi pluviometrici, è possibile calcolare l'altezza critica, dato un certo tempo di ritorno (215 anni per questo studio), mediante la formula 7.

Tabella 28: **Altezze critiche di precipitazione, suddivise per durata di precipitazione.**

Tempo di prec. [ore]	Altezza di pioggia empirica [mm]	Altezza di pioggia teorica [mm]
0.25	29.91	30.25
0.5	47.04	43.14
0.75	54.49	53.09
1	75.33	61.52
2	77.28	87.73
3	78.97	107.97
6	147.66	153.96
12	221.59	219.55
24	369.78	313.09

Da questi dati è possibile creare un grafico che indichi l'andamento pluviometrico in funzione della durata dell'evento stesso.

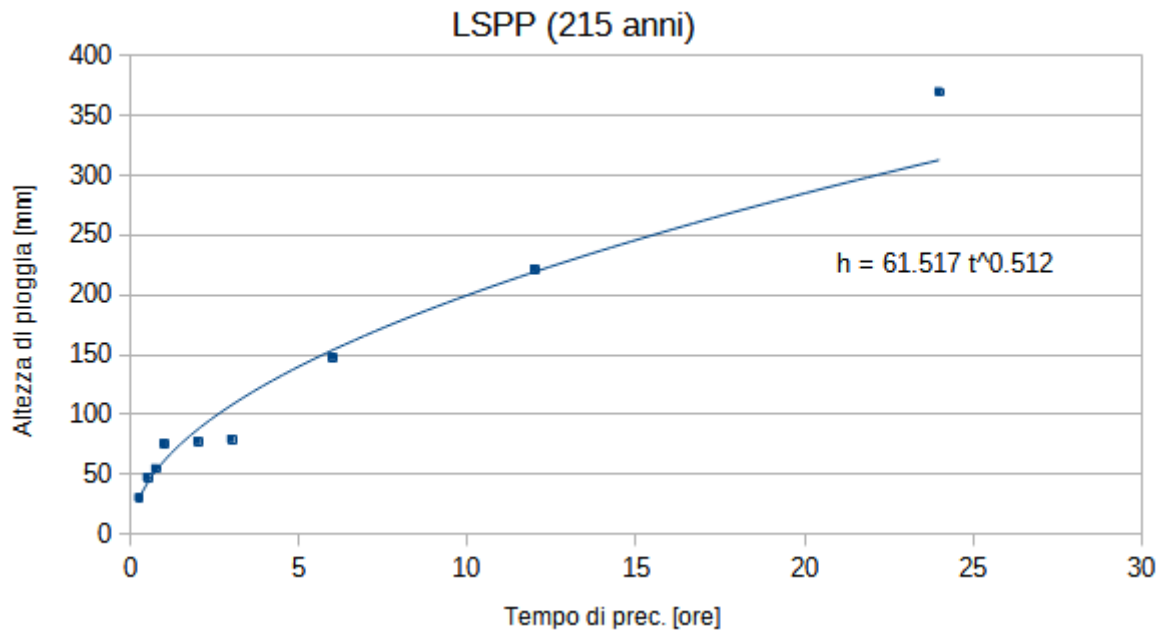


Figura 3: LSPP per un tempo di ritorno di 215 anni, con assi a scala lineare.

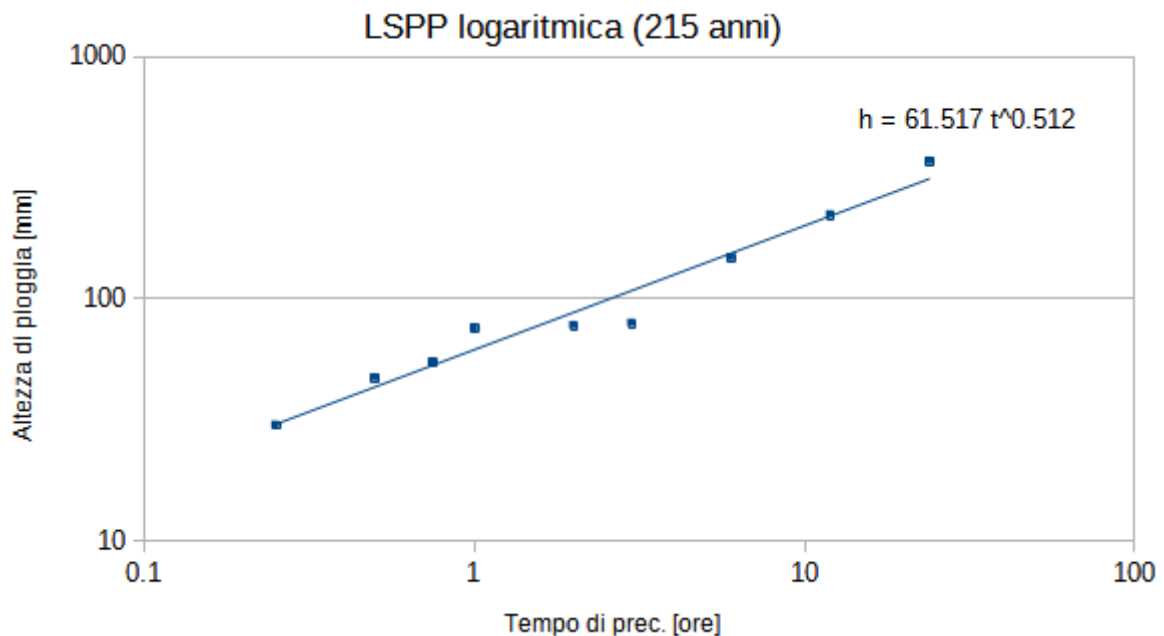


Figura 4: LSPP per un tempo di ritorno di 215 anni, con assi a scala logaritmica.

5 Nozioni generali sull'utilizzo di HEC-HMS

5.1 Metodo CN-SCS

Il metodo CN-SCS permette di quantificare il volume di pioggia che può diventare deflusso di runoff, a seconda delle caratteristiche del suolo e del soprassuolo.

Infatti, un suolo impermeabilizzato risponderà in modo differente rispetto ad uno vegetato.

Semplificando, è possibile quantificare le tendenze del suolo e del soprassuolo a generare deflusso,

infiltrazione o perdita iniziale di pioggia, mediante l'attribuzione di un preciso valore, in una scala da 0 a 100 (ovvero dalla condizione più permeabile alla più impermeabile).

Generalmente, i valori di CN (*curve number*) sono riportati in varie tabelle, a seconda della natura del bacino di studio.

Per esempio, al seguente link si riportano le tabelle rese disponibili dal manuale di utilizzo del manuale di HEC-HMS: [3].

5.2 Time Lag

Il tempo di lag (ritardo) è lo scostamento che interessa una qualsiasi quantità d'acqua in movimento all'interno di un elemento del bacino (un sottobacino, un tratto di canale,...).

A seconda del caso, può quantificare la distanza in minuti tra i baricentri di precipitazione e deflusso, oppure la differenza temporale tra il baricentro di precipitazione ed il picco di deflusso. Questo fattore non genera alcuna perdita di volume di acqua o diffusione del processo.

5.3 Coefficiente di Nash-Sutcliffe

Il coefficiente di Nash-Sutcliffe è un parametro statistico che permette di valutare come la predizione idrologica sia affidabile rispetto all'evento reale.

La bontà di predizione viene valutata mediante un range tra 0 e 1, dove quest'ultimo indica che la simulazione è uguale al fenomeno osservato. Valori superiori a 0.9 risultano sufficientemente buoni per accettare l'ottimizzazione del modello idrologico.

Infatti, l'applicazione pratica del coefficiente di Nash-Sutcliffe è paragonabile al parametro statistico di scostamento R^2 .

Ulteriori informazioni su questo indicatore statistico possono essere ricavate dalla voce Wikipedia [4].

6 Procedimento su HEC-HMS

Dopo aver ottenuto la funzione della LSPP per il proprio tempo di ritorno, è possibile proseguire con l'analisi idrologica su HEC-HMS.

Per fare ciò, è necessario creare un modello idrologico per ogni bacino, in modo da immettere in input i valori pluviometrici calcolati precedentemente.

Il *modello idrologico* è una semplificazione del fenomeno reale (che nel nostro caso è la trasformazione degli afflussi in deflussi).

Il modello idrologico, affinché possa essere considerato nella simulazione, deve avere i seguenti parametri:

- bacino idrologico: indica la struttura del bacino, comprendente gli eventuali sottobacini o particolari elementi idraulici (come per esempio i canali fluviali o serbatoi);
- modello meteorologico: sintetizza le caratteristiche pluviometriche dell'evento meteorologico, come per esempio i bacini interessati o gli effetti ambientali del vento e dell'evapotraspirazione;
- specifiche di controllo: contiene le caratteristiche generali della simulazione da effettuare, come per esempio il momento di inizio e di fine;
- serie di dati temporali: rappresentano i valori (noti) che è possibile introdurre nel modello meteorologico, come per esempio valori pluviometrici o di deflusso. Come riportato successivamente, in questa finestra sono stati introdotti i valori pluviometrici e di deflusso reali dell'evento Vaia, in modo da calibrare il modello.

Ulteriori proprietà, come per esempio i modelli digitali del terreno, possono essere introdotti successivamente nel software.

Come anticipato precedentemente, in questa relazione si andrà a studiare la risposta idraulica di due bacini, quindi risulta necessario creare due modelli di calcolo.

6.1 Creare e calibrare il modello idrologico

Al fine di creare un modello idrologico, e conseguentemente calibrarlo, si è scelto di studiare i bacini simulando l'evento eccezionale di Vaia del 2018.

In questo modo, avendo a disposizione valori certi di afflussi e deflussi, è possibile paragonare la risposta di output dal bacino che il programma calcola, con quella effettivamente misurata. Questa operazione non sarebbe completamente corretta, poiché sarebbe più opportuno analizzare e calibrare il bacino per eventi pluviometrici di durata maggiore a 4-5 giorni, bensì settimane o mesi.

Al fine di cominciare l'analisi in HEC-HMS, è necessario introdurre nel software i parametri precedentemente elencati, riferiti alla tempesta Vaia:

- bacino idrologico: sono stati introdotti i file raster dei bacini (1 e 2) ed i valori di primo tentativo di CN e Lag time di piena (rispettivamente 35 e 270 minuti);
- modello meteorologico: è stata specificata la sola natura pluviometrica dell'evento, e quali bacini meteorologici incide;
- specifiche di controllo: si è definito il periodo interessato, che in questo caso va dal 27 ottobre 2018 al 1 novembre 2018;
- serie di dati temporali: sono stati introdotti i valori pluviometrici analizzati dai pluviometri di ogni sottobacino ed i valori di deflusso misurati dagli idrometri alla sezione di chiusura.

In particolare, le serie di dati temporali sono state ricavate da:

- i pluviometri di Auronzo, Domegge e Santo Stefano per i relativi sottobacini del Piave;
- il pluviometro di Cortina, per il bacino del fiume Boite;
- l'idrometro del Piave, alla sua sezione di chiusura;
- l'idrometro del Boite, alla sua sezione di chiusura.

Dopo aver avviato la simulazione, il cui procedimento è ampiamente riportato nel manuale ufficiale [5], è possibile studiare il grafico afflussi-deflussi che il programma restituisce.

Il grafico riferito all'elemento in uscita dal bacino, sia questo un tratto di fiume o un punto di confluenza, possiede un solo istogramma di pioggia, ma due linee di deflusso: una riferita all'evento reale (misurato) ed una calcolata secondo i parametri di primo tentativo introdotti all'inizio (simulato).

Molto probabilmente, può capitare che le linee di deflusso non coincidano reciprocamente in modo sufficientemente buono; per questo motivo, risulta essenziale svolgere la *calibrazione del bacino*.

Il processo di calibrazione del modello consiste nell'indicare al programma quali parametri del bacino andare a modificare (come per esempio il CN o il lag time), in modo che la curva del deflusso calcolato possa coincidere nel modo più ottimale possibile con quella osservata.

Il software, al fine di ottenere il valore ottimale, svolge una serie di calcoli iterativi, mediante i quali analizza i parametri che l'operatore vuole che vengano migliorati.

Dopo aver svolto il processo di calibrazione, è possibile introdurre i parametri ottimali che il programma restituisce nel riquadro inerente alle caratteristiche del bacino; in questo modo si è a conoscenza delle caratteristiche (temporali o fisiche) che meglio approssimano quelle reali.

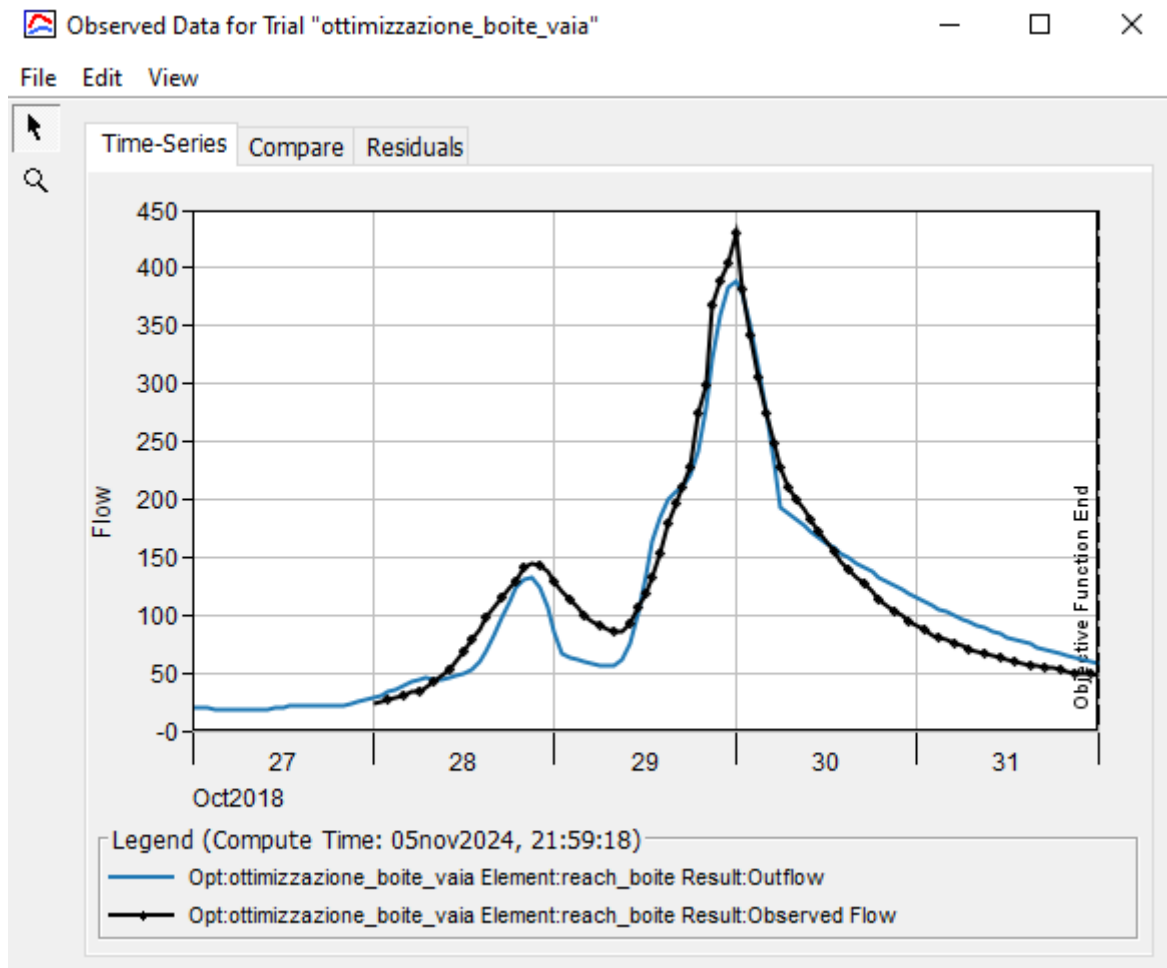


Figura 5: Grafico afflussi-deflussi ottimizzato del bacino del Boite, riferito all'evento della tempesta Vaia.

<div> <div> </div> <div> Optimized Parameter Results for Trial "ottimizzazione_boite_vaia" <div> <div>—</div> <div>□</div> <div>×</div> </div> </div> </div>				
<div> <div>Project:esercitazione_piave_boite</div> <div>Optimization Trial:ottimizzazione_boite_vaia</div> </div>				
<div> <div>Start of Trial: 27ott2018, 00:00</div> <div>Basin Model: boite</div> </div>				
<div> <div>End of Trial: 01nov2018, 00:00</div> <div>Meteorologic Model:precipitazione vaia</div> </div>				
<div> <div>Compute Time:11nov2024, 17:43:34</div> </div>				
Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
subBoite	SCS Curve Number - Curve Nu...		35	33.086
subBoite	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	270	241.76

Figura 6: Parametri ottimizzati del bacino del Boite, riferito all'evento della tempesta Vaia.

In questo caso, l'algoritmo di ottimizzazione del software ritiene che i valori di CN pari a 33 e di lag time pari a 242 minuti siano quelli che meglio approssimano la curva di deflusso simulata del Boite rispetto a quella osservata.

Il parametro di Nash Sutcliffe, descritto precedentemente, è pari a 0.932

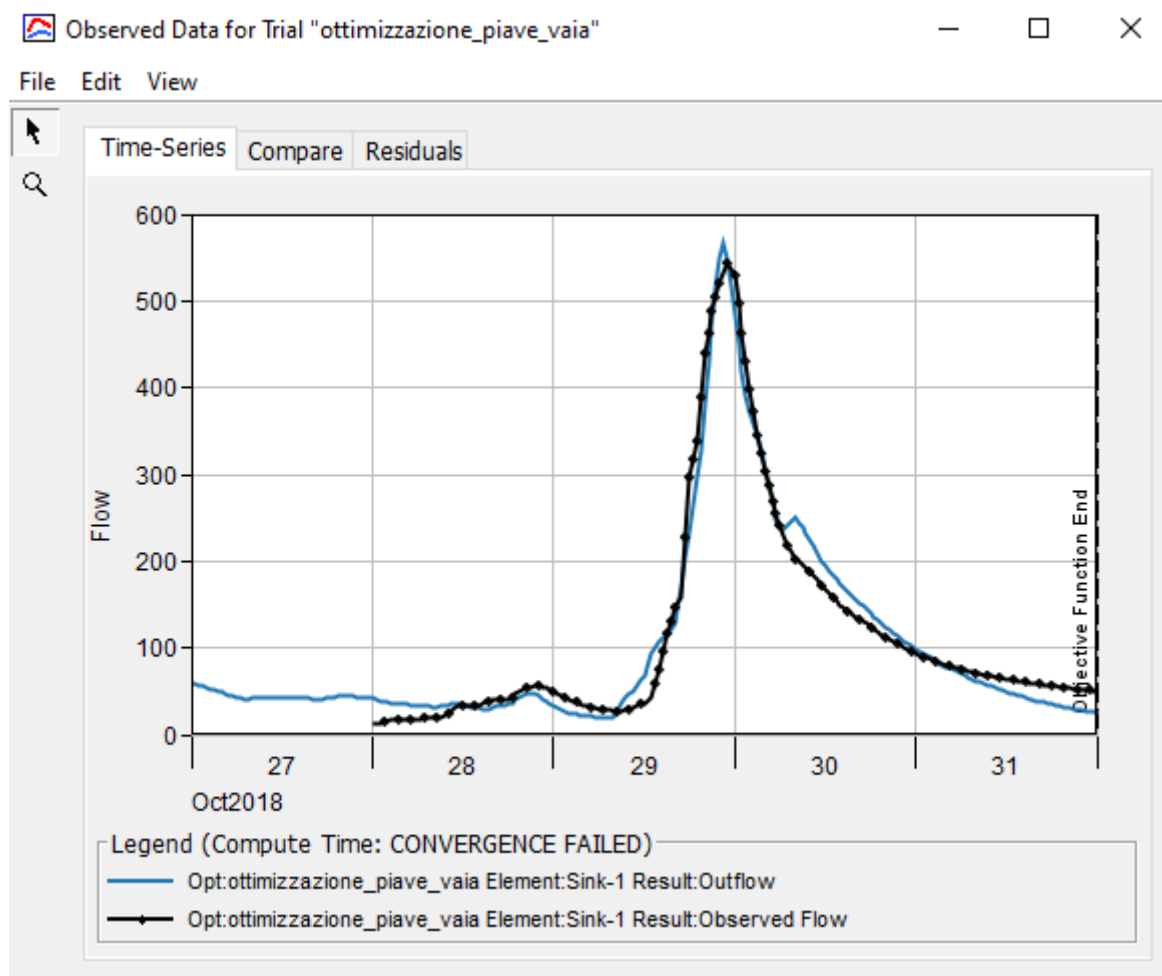


Figura 7: Grafico afflussi-deflussi ottimizzato del bacino del Piave, riferito all'evento della tempesta Vaia.

Optimized Parameter Results for Trial "ottimizzazione_piave_vaia"

Project:esercitazione_piave_boite Optimization Trial:ottimizzazione_piave_vaia

Start of Trial: 27ott2018, 00:00 Basin Model: piave

End of Trial: 01nov2018, 00:00 Meteorologic Model:precipitazione vaia

Compute Time:CONVERGENCE FAILED

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Sub_piave_1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	250	121.98
sub_piave_2	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	120	73.003
sub_piave_3	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	120	81.916
Sub_piave_1	SCS Curve Number - Curve Nu...		30	20.792
sub_piave_2	SCS Curve Number - Curve Nu...		40	25.504
sub_piave_3	SCS Curve Number - Curve Nu...		40	25.504

Figura 8: Parametri ottimizzati del bacino del Piave, riferito all'evento della tempesta Vaia.

Nel caso dell'ottimizzazione svolta per il bacino del Piave, basata sull'evento Vaia, il parametro di Nash Sutcliffe è pari a 0.973.

Successivamente ad aver ricavato i parametri ottimizzati, ed averli introdotti nella finestra dei relativi bacini, si è sicuri che le successive simulazioni (qualsiasi esse siano) si baseranno su valori il più possibile coerenti con le caratteristiche reali.

E' doveroso far presente che i dati di CN e del Lag Time del bacino del Piave hanno dei valori insoliti, perché all'interno di esso sono presenti degli invasi, che vanno a modificare l'arrivo alla sezione di chiusura dell'acqua. Molto probabilmente, un territorio così naturale, con ampie foreste di conifere e prati, possiede un valore medio un di CN che si attesta intorno ai 35-40.

6.2 Applicazione del modello idrologico al proprio tempo di ritorno

Avendo effettuato la calibrazione del modello idrologico, è possibile ripetere la medesima operazione svolta precedentemente e calcolare il volume di deflusso, data la propria precipitazione con un certo tempo di ritorno (215 anni per questa relazione).

Questi grafici di deflusso prendono anche il nome di *idrogrammi di piena sintetici*.

In questo caso, si andrà a creare un nuovo modello meteorologico, cercando però di simulare una precipitazione di durata simile a quella del tempo di corrivazione, in modo da massimizzare per tutti e due i casi i picchi.

Precipitazioni di durata inferiore al tempo di corrivazione del bacino non permettono il simultaneo deflusso di tutti i sottobacini; d'altra parte, durate di pioggia superiori al tempo di risposta del bacino possiedono intensità inferiori.

Per questi motivi, e per quanto calcolato al capitolo sul tempo di corrivazione, si è scelto di imporre una durata di 12 ore al bacino del Boite e di 24 ore al bacino del Piave.

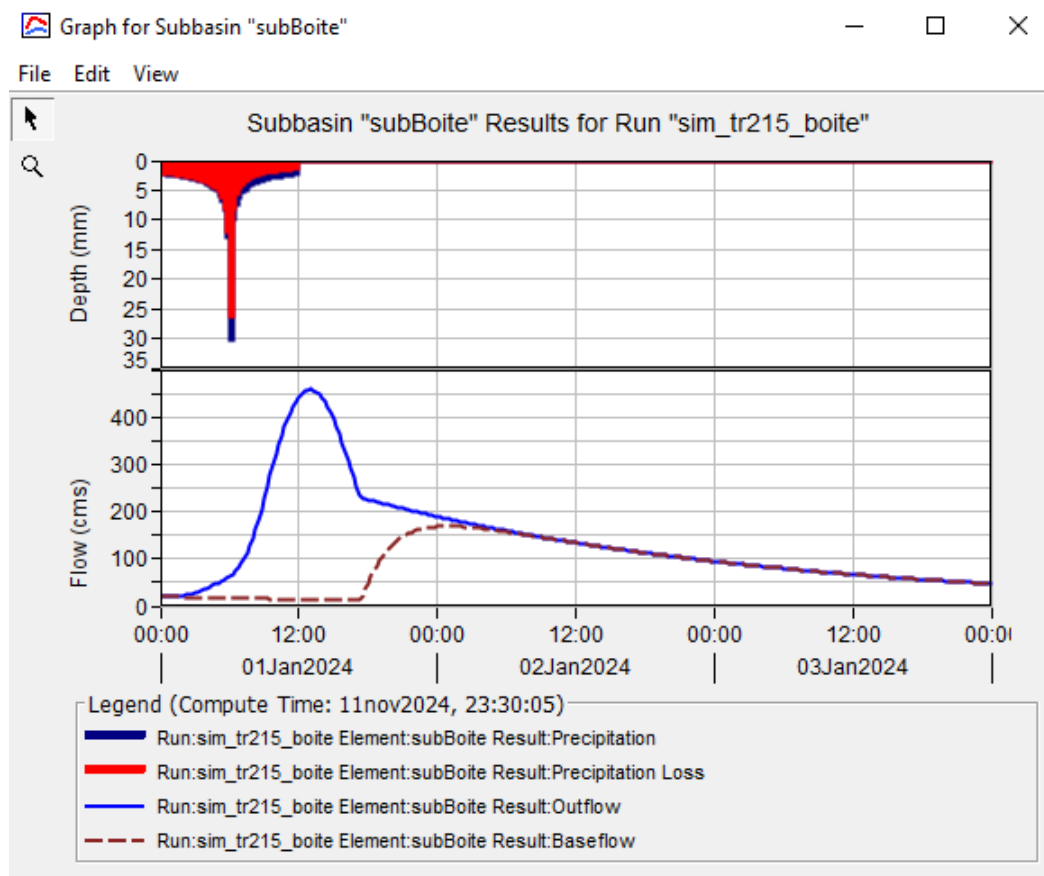


Figura 9: Grafico afflussi-deflussi del bacino del Boite, riferito ad un tempo di ritorno pluviometrico di 215 anni.

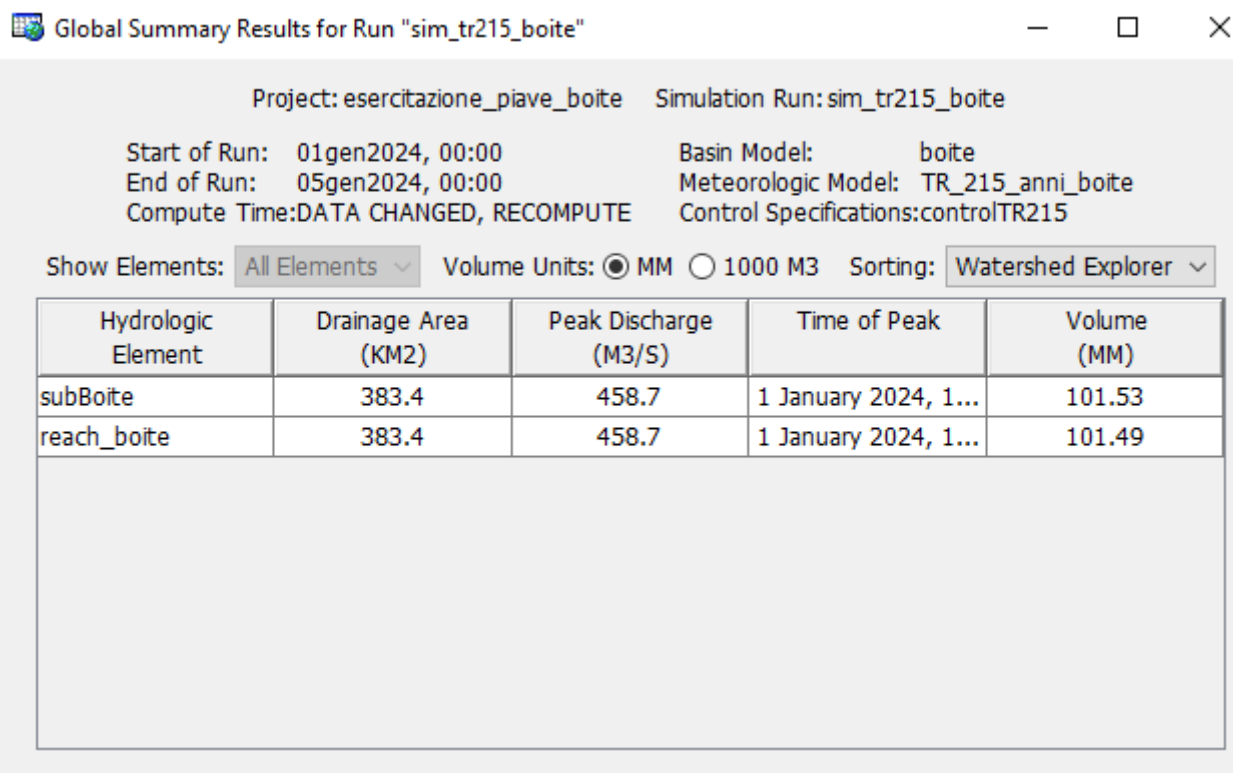


Figura 10: Risultati dello studio dei deflussi del bacino del Boite, dato un certo tempo di ritorno.

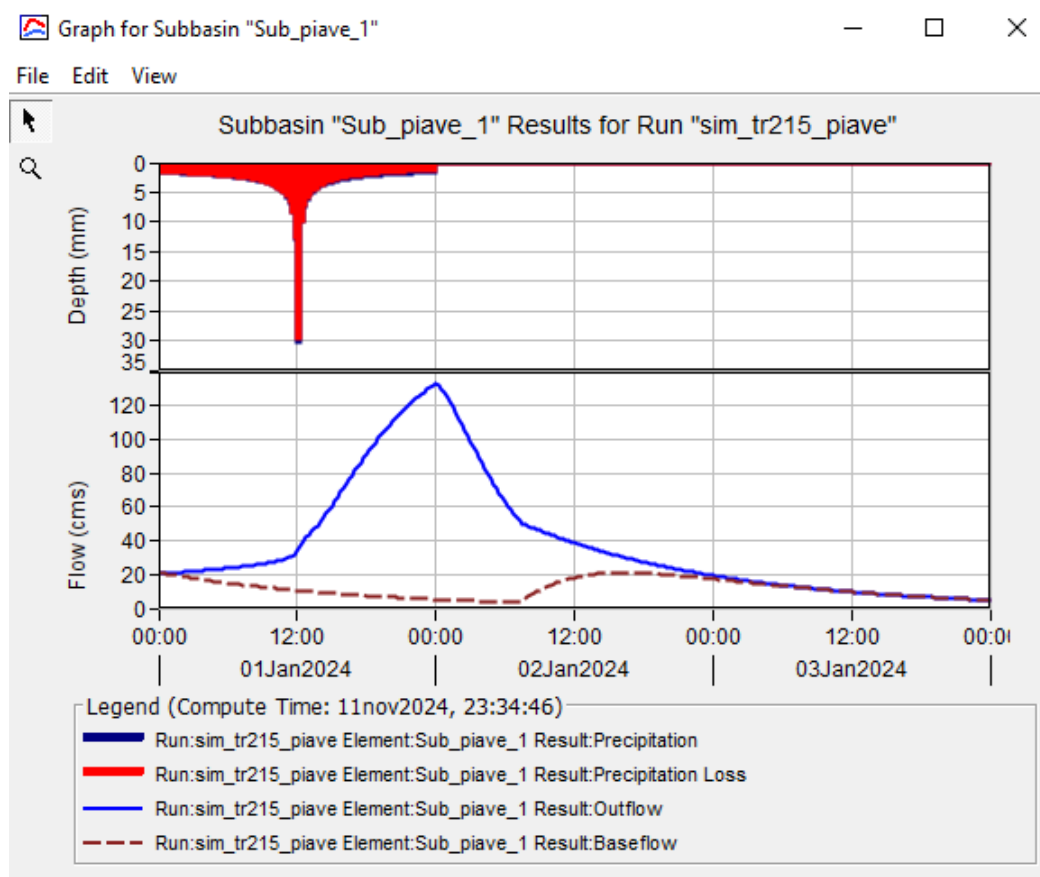


Figura 11: Grafico afflussi-deflussi del sottobacino 1 del Piave, riferito ad un tempo di ritorno pluviometrico di 215 anni.

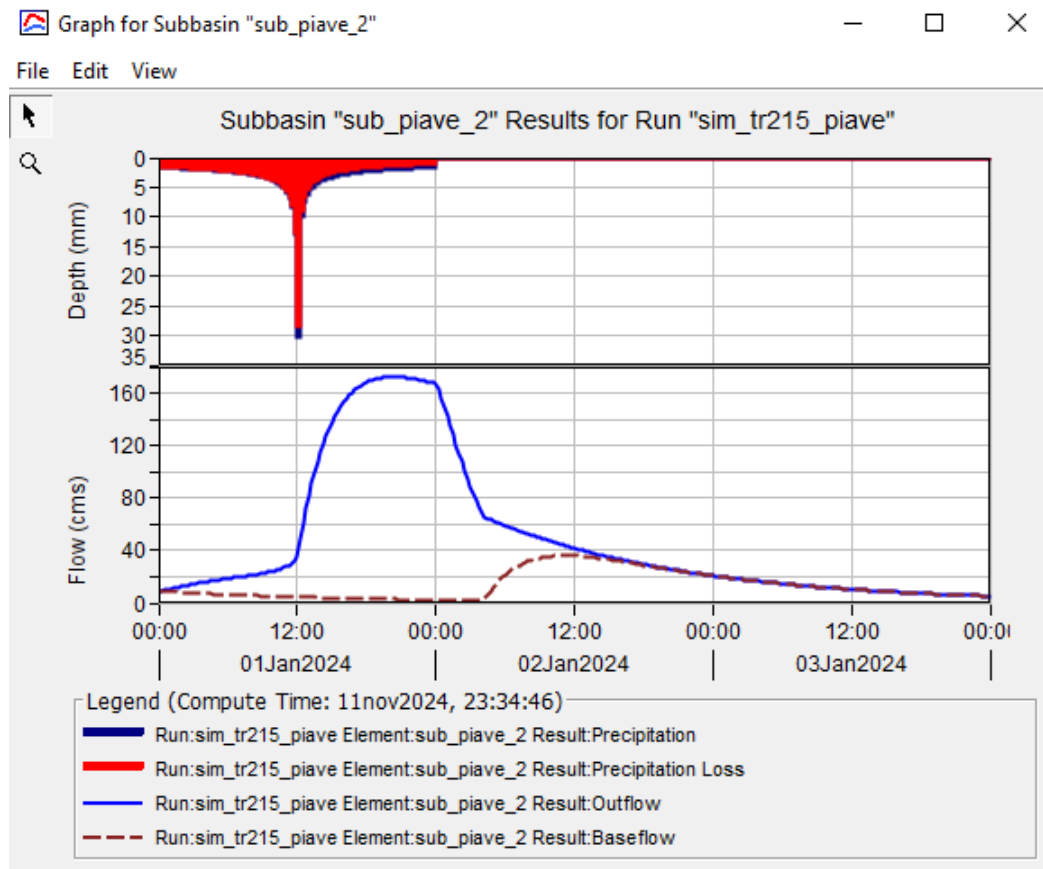


Figura 12: Grafico afflussi-deflussi del sottobacino 2 del Piave, riferito ad un tempo di ritorno pluviometrico di 215 anni.

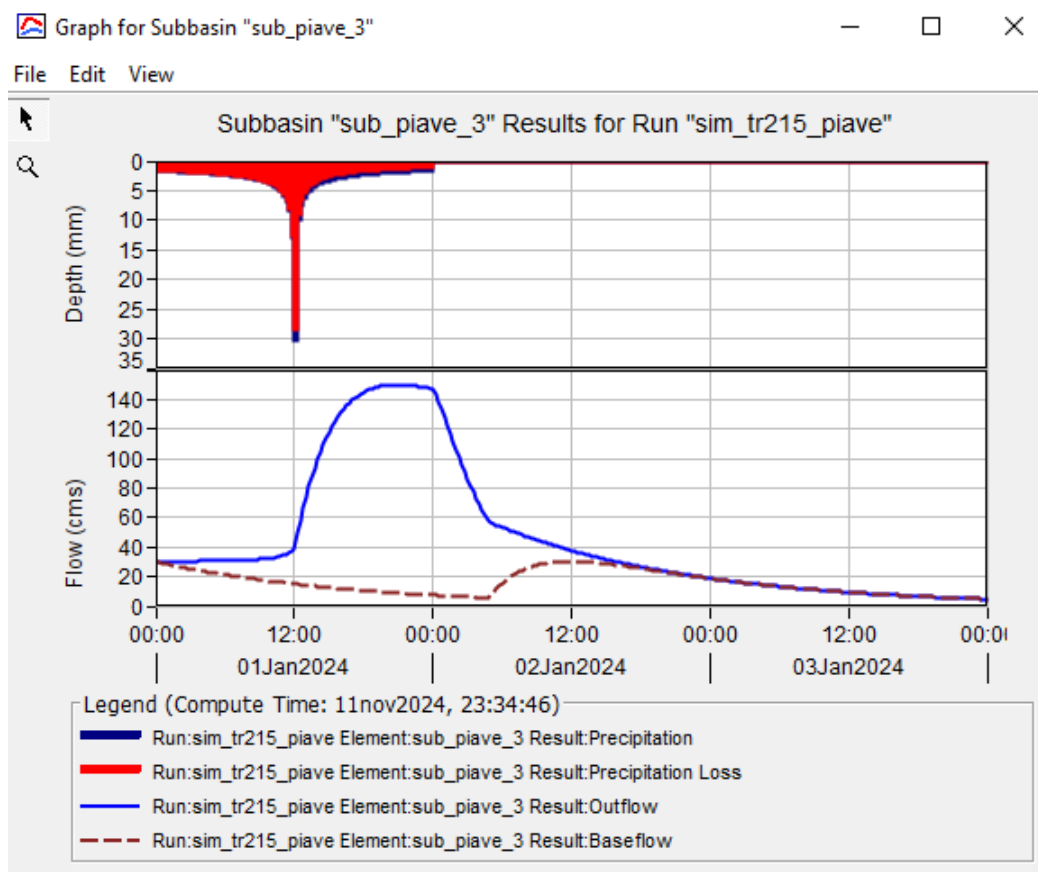


Figura 13: Grafico afflussi-deflussi del sottobacino 2 del Piave, riferito ad un tempo di ritorno pluviometrico di 215 anni.

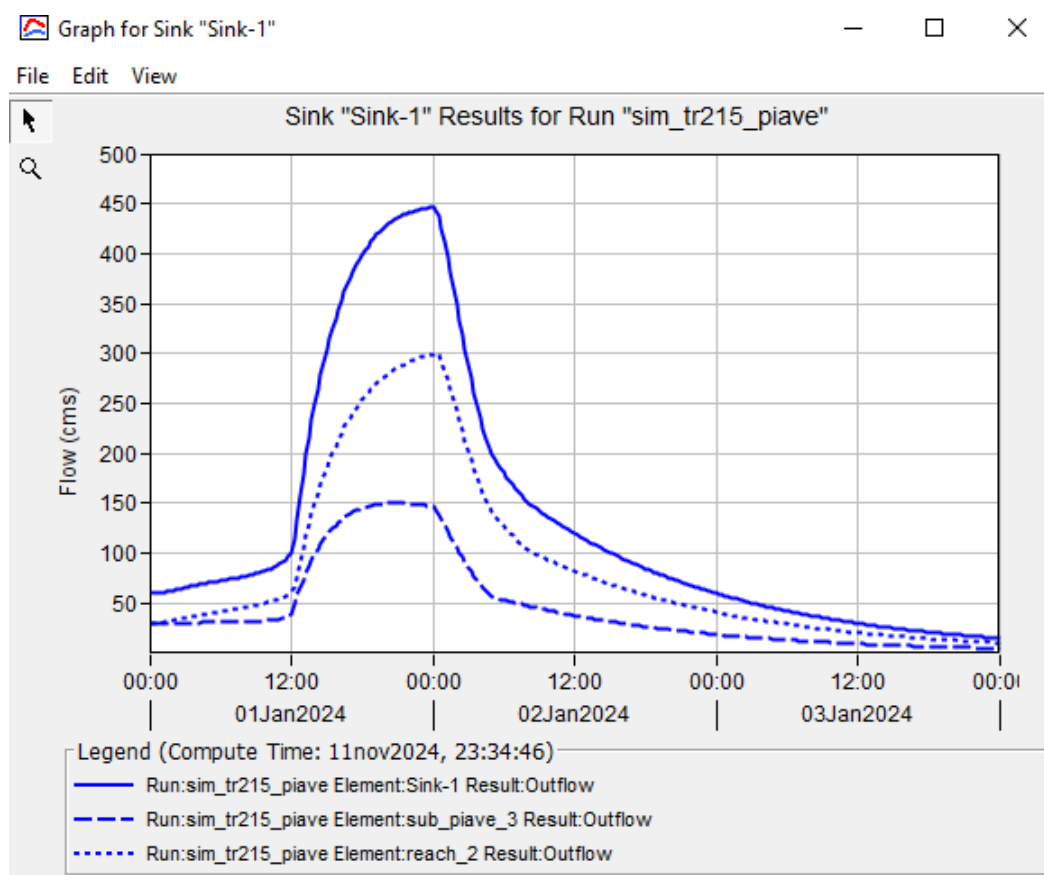


Figura 14: Grafico dei deflussi totali del bacino del Piave, riferito ad un tempo di ritorno pluviometrico di 215 anni.

Global Summary Results for Run "sim_tr215_piave"

Project: esercitazione_piave_boite Simulation Run: sim_tr215_piave

Start of Run: 01gen2024, 00:00 Basin Model: piave
End of Run: 05gen2024, 00:00 Meteorologic Model: TR_215_anni_piave
Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: controlTR215

Show Elements: All Elements Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
Sub_piave_1	370.9	133.0	1 January 2024, 2...	27.93
junction_2	611.2	300.5	1 January 2024, 2...	38.10
sub_piave_2	240.3	172.4	1 January 2024, 2...	53.78
sub_piave_3	203.8	150.2	1 January 2024, 2...	59.61
reach_2	611.2	300.1	2 January 2024, 0...	38.16
Sink-1	815.0	446.5	1 January 2024, 2...	43.53

Figura 15: Risultati dello studio dei deflussi del bacino del Piave, dato un certo tempo di ritorno.

6.3 Analisi dei risultati ottenuti

Dopo aver svolto i calcoli per ricavare il deflusso dei bacini, è possibile compiere alcuni ragionamenti.

Il bacino del Boite è interessato da una precipitazione che è di durata minore e più simile al tempo di corrivazione rispetto a quella che si verifica nel bacino del Piave.

Entrambe queste caratteristiche fanno in modo che il picco di deflusso del bacino del Boite risulti molto maggiore a quello del Piave (com'è possibile verificare nelle immagini 10 e 15).

Come anticipato precedentemente, i valori del CN del bacino del Piave sono eccessivamente ridotti rispetto a quelli reali, poiché all'interno di esso sono presenti dei bacini di immagazzinamento che fanno variare la curva di deflusso, come per esempio laghi naturali o artificiali (dighe). Conoscendo la dinamica di rilascio d'acqua dai bacini, sarebbe possibile migliorare il modello idraulico, rendendolo più simile alla realtà.

I bassi valori di CN del bacino del Piave fanno aumentare il volume di storage idrico del terreno, e di conseguenza anche le perdite iniziali; ne consegue che, il terreno ha una minore tendenza a generare deflusso superficiale, ma al contrario ad infiltrare acqua.

Queste caratteristiche possono essere dimostrate analizzando le differenze di volumi idrici defluiti alle sezioni di chiusura: una precipitazione nel bacino del Piave di doppia durata rispetto a quella del Boite genera un runoff di volume inferiore alla metà di quest'ultimo (come osservabile nelle figure 10 e 15).

Nel caso in cui si volesse implementare maggiormente il modello idrologico, si dovrebbe prendere in considerazione anche altri parametri ambientali, come per esempio quelli radiativi del sole o quelli vegetativi degli alberi, entrambi non disponibili per queste simulazioni.

7 Conclusioni

In questa relazione si è andati a studiare, tramite un modello idrologico, le risposte di due bacini montani, a fronte di una precipitazione con tempo di ritorno pari a 215 anni.

Mediante analisi statistico-probabilistica è stata ricavata la curva LSPP per il medesimo periodo di ritorno; tale funzione è pari a $h = 61.517 \cdot t^{0.512}$.

Dalla funzione interpolatrice sono state ricavate le altezze di pioggia da introdurre nel software HEC-HMS, in modo da permettergli di generare il diagramma degli afflussi-deflussi, mediante un modello già calibrato in precedenza.

A fronte di una precipitazione con tempo di ritorno pari a 215 anni, il bacino del Boite genera un picco di deflusso di $458.7 \frac{m^3}{s}$, mentre il bacino del Piave ne genera uno complessivo di $446.5 \frac{m^3}{s}$.

L'altro risultato importante da considerare è il volume defluito alla sezione di chiusura alla fine dell'evento pluviometrico con tempo di ritorno di 215 anni, che è pari a 101.49 mm per il bacino del Boite e 43.53 mm per il bacino del Piave.

Bibliografia

- [1] *Fiume Boite* - *Wikipedia*. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Boite>.
- [2] *Fiume Piave* - *Wikipedia*. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Piave>.
- [3] *CN Tables* - *HEC-HMS Technical Reference Manual*. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/cn-tables>.
- [4] *Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient* - *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nash%E2%80%93Sutcliffe_model_efficiency_coefficient.
- [5] *HEC-HMS User's Manual*. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest>.