

S.S. 38 - LOTTO 4: VARIANTE DI TIRANO DALLO SVINCOLO DI STAZZONA (COMPRESO) ALLO SVINCOLO DI LORETO (CON COLLEGAMENTO ALLA DOGANA DI POSCHIAVO)

**S.S. 38 - LOTTO 4: NODO DI TIRANO -
TRATTA "A" (SVINCOLO DI BIANZONE - SVINCOLO LA GANDA)
E TRATTA "B" (SVINCOLO LA GANDA - CAMPONE IN TIRANO)**

PROGETTO ESECUTIVO

 STUDIO CORONA Ing. Renato Vaira (Ordine degli Ingg. di Torino e Provincia n° 4863 W)	 Ing. Valerio Bajetti Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-26211	ING. RENATO DEL PRETE Ing. Renato Del Prete Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5073	ECOPLAN <small>Studio E. Caporin & G. Saffari s.associati</small> Arch. Nicoletta Frattini Ordine degli Arch. di Torino e provincia n° A-8433	 Ing. Gabriele Incecchi Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-12102
	 Società designata: GA&M Prof. Ing. Matteo Ranieri Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1137	SETAC Srl Servizi & Engineering Trasporti Ambiente Costruzioni Prof. Ing. Luigi Monterisi Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1771	ARKE' INGEGNERIA s.r.l. <small>Via Imperatore Traiano, 4 - 70126 Bari</small> Ing. Gioacchino Angarano Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5970	DOTT. GEOL. DANILO GALLO Dott. Geol. Danilo Gallo Ordine dei Geologi della Regione Puglia n° 588

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO Dott. Ing. Giancarlo LUONGO	RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE  Ing. Valerio BAJETTI	GEOLOGO  Dott. Geol. Francesco AMANTIA SCUDERI	IL COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE  Ing. Gaetano RANIERI
---	---	---	--

<h1>F002</h1>	<h2>F - PROGETTO IDRAULICO</h2> <h3>F0 - ELABORATI DI INQUADRAMENTO GENERALE</h3> <h4>RELAZIONE IDROLOGICA</h4>
---------------	---

CODICE PROGETTO PROGETTO LIV. PROG. N. PROG. MI324 E 1801	NOME FILE F002-T00ID00IDRRE02_A.dwg	REVISIONE A	SCALA: ----
CODICE ELAB.	T00ID00IDRRE02	A	----

C					
B					
A	EMISSIONE	GENNAIO 2019	ING. FABRIZIO BAJETTI	ING. FABRIZIO BAJETTI	ING. VALERIO BAJETTI
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

SOMMARIO

1 PREMESSA 2

2 ANALISI PLUVIOMETRICA PER LA DETERMINAZIONE DELLE ALTEZZE DI PIOGGIA DI PROGETTO 2

2.1	Piogge orarie	3
2.2	Scrosci.....	6
2.2.1	metodo di Bell.....	6
2.2.2	Calcolo della curva di possibilità pluviometrica per gli eventi di piogge intense di breve durata con il metodo di Bell	10
2.3	Piogge di progetto.....	13

3 DETERMINAZIONE DELLA PORTATA DI PIENA DI PROGETTO NEL TRATTO DI FIUME ADDA INTERESSATO DALLE OPERE14

3.1	Studi pregressi considerati nella precedente fase progettuale	14
3.1.1	Studio del Prof. Ing Silvio Franzetti, commissionato dalla comunità Montana Alta Valtellina (1984)	15
3.1.2	Studio di CAE-ISMES, commissionato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Regione Lombardia (1988)	18
3.1.3	Studio di fattibilità della sistemazione idraulica e di versante (Val di Pola) redatto dalla Soc. Italtelna, commissionato dalla Regione Lombardia (1989)	19
3.1.4	Calcoli idrologici per il "Piano e programma di ricostruzione, riconversione e sviluppo della valtellina, delle zone adiacenti delle provincie di Como, Bergamo e Brescia colpite dalle avversità atmosferiche dei mesi di luglio-agosto 1987", commissionato dalla Regione Lombardia (1990).....	20
3.1.5	Studio della Soc. Hydrodata, commissionato dal Ministero dei Lavori pubblici – Magistrato per il Po (1997)	21
3.1.6	Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI).....	22
3.1.7	Studio della Pro.i.ter s.r.l. et al. per Regione Lombardia e A.N.A.S. per la progettazione della variante di Tirano della SS 38 (2003)	24
3.1.8	Studio AIPo-Agenzia Interregionale per il fiume Po (2008)	26
3.2	Ulteriori studi analizzati nel presente progetto.....	27
3.2.1	Progetto FLORA – Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale	27
3.2.2	Studio degli Ingg. Baggini Amos e Begnis Raffaella, commissionato dalla Provincia di Sondrio (2012)	28
3.2.3	Progetto di Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (2014)	29
3.3	Conclusioni in merito all'analisi degli studi pregressi.....	30
3.4	Analisi idrologica.....	32
3.4.1	Regionalizzazione delle portate (VA.PI.).....	32
3.4.2	Elaborazione statistica dei dati di portata misurata	34
3.4.3	Analisi con metodo afflussi-deflussi	36
3.5	Portate di progetto	49

1 PREMESSA

Il presente documento espone la procedura utilizzata per l'analisi idrologica necessaria per il dimensionamento delle opere del progetto esecutivo della "SS38 dello Stelvio – lotto 4 nodo di Tirano" e per le verifiche di compatibilità idraulica.

Lo studio idrologico si basa sui dati idrologici più aggiornati.

In particolare, il presente documento riporta lo studio degli aspetti idrologici e in particolare:

- Il capitolo 1 sviluppa un aggiornamento dell'analisi pluviometrica alla luce di dati e valutazioni più recenti, sia per le piogge orarie sia per gli scrosci;
- I paragrafi 2.1 e 2.2 riportano un'analisi degli studi pregressi disponibili per l'area di interesse;
- I paragrafi 2.4 e 2.5 riportano la nuova analisi idrologica e la valutazione della portata in Adda a monte e a valle della confluenza con il torrente Poschiavino.

2 ANALISI PLUVIOMETRICA PER LA DETERMINAZIONE DELLE ALTEZZE DI PIOGGIA DI PROGETTO

Nel presente capitolo viene illustrata l'analisi pluviometrica che sarà alla base delle successive attività di modellazione e progettazione.

Le curve di possibilità pluviometrica rappresentative del bacino imbrifero dell'Adda chiuso presso l'area in esame permetteranno di valutare con il metodo afflussi-deflussi le portate di progetto con le quali eseguire l'analisi idraulica del tratto di fiume Adda interessato dall'opera. Data l'estensione del bacino si tratterà di curve di possibilità pluviometrica orarie.

Per la progettazione dei tombini di attraversamento del rilevato stradale per l'allontanamento delle acque locali e di versante sarà necessario definire il valore della piena di progetto di un determinato bacino imbrifero basato sulla base delle curve di possibilità pluviometrica riferite a piogge suborarie (scrosci) ottenute a partire da quelle orarie.

Le curve relative agli scrosci saranno utilizzate anche per la progettazione delle opere di raccolta e smaltimento delle acque di piattaforma dell'infrastruttura stradale in progetto.

La curva che fornisce, per un fissato tempo di ritorno (T_R), l'altezza di pioggia (h) in funzione della durata (t) dell'evento pluviometrico è definita secondo l'equazione:

$$h = a \cdot (t_p)^n$$

dove i coefficienti a e n utilizzati nella progettazione, relativi all'analisi pluviometrica oraria o a quella degli scrosci, sono riportati nel successivo paragrafo 1.3.

2.1 PIOGGE ORARIE

Per l'analisi dei dati relativi alle piogge con durata superiore all'ora si è fatto riferimento ai valori dei parametri messi a disposizione, per la zona ove insistono le opere in progetto, da ARPA Lombardia tramite il proprio Portale Idrologico Geografico.

ARPA Lombardia ha svolto attività di aggiornamento della descrizione statistica delle precipitazioni intense sulla base di osservazioni storiche (1929-2001) di stazioni pluviometriche del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale e osservazioni recenti (1987-2011) ottenute da stazioni pluviometriche di proprietà dell'Agenzia.

I dati sono stati elaborati mediante un modello scala-invariante secondo la distribuzione probabilistica GEV (Generalized Extreme Value); i parametri ottenuti sono stati estesi a tutto il territorio regionale tramite tecniche di estrapolazione geostatistica.

L'atlante delle piogge intense è stato calcolato puntualmente su una maglia di 1kmx1km in forma esplicita per le durate da 1 a 24 ore e per tempi di ritorno dai 10 ai 200 anni. ARPA Lombardia rende disponibili anche i valori dei parametri della distribuzione GEV per ogni punto-griglia consentendo così la stima della pioggia di progetto per qualsiasi tempo di ritorno.

La formulazione analitica utilizzata per la stima dei parametri è la seguente:

$$h_T(D) = a_1 w_T D^n$$

$$w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]^k \right\}$$

dove:

D = durata della precipitazione;

T = tempo di ritorno;

a_1 = coefficiente pluviometrico orario = 21,91;

n = coefficiente di scala = 0,3771;

GEV – parametro α = 0,293;

GEV – parametro k = -0,131;

GEV – parametro ε = 0,782.

Per la zona di Tirano si è ottenuta la seguente tabella dei risultati.

Tr [anni]	2	5	10	20	50	100	200
wt	0.8920	1.2676	1.5488	1.8458	2.2743	2.6315	3.0213
Durata (ore)	TR 2	TR 5	TR 10	TR 20	TR 50	TR 100	TR 200
1	19.5	27.8	33.9	40.4	49.8	57.7	66.2
2	25.4	36.1	44.1	52.5	64.7	74.9	86.0
3	29.6	42.0	51.4	61.2	75.4	87.2	100.2
4	33.0	46.8	57.2	68.2	84.0	97.2	111.7
5	35.9	51.0	62.3	74.2	91.4	105.8	121.5
6	38.4	54.6	66.7	79.5	97.9	113.3	130.1
7	40.7	57.9	70.7	84.2	103.8	120.1	137.9
8	42.8	60.8	74.3	88.6	109.2	126.3	145.0
9	44.8	63.6	77.7	92.6	114.1	132.0	151.6
10	46.6	66.2	80.9	96.4	118.7	137.4	157.7
11	48.3	68.6	83.8	99.9	123.1	142.4	163.5
12	49.9	70.9	86.6	103.2	127.2	147.2	169.0
13	51.4	73.1	89.3	106.4	131.1	151.7	174.1
14	52.9	75.1	91.8	109.4	134.8	156.0	179.1
15	54.3	77.1	94.2	112.3	138.4	160.1	183.8
16	55.6	79.0	96.5	115.1	141.8	164.0	188.3
17	56.9	80.8	98.8	117.7	145.0	167.8	192.7
18	58.1	82.6	100.9	120.3	148.2	171.5	196.9
19	59.3	84.3	103.0	122.8	151.3	175.0	200.9
20	60.5	86.0	105.0	125.2	154.2	178.4	204.9
21	61.6	87.5	107.0	127.5	157.1	181.7	208.7
22	62.7	89.1	108.9	129.7	159.9	185.0	212.4
23	63.8	90.6	110.7	131.9	162.6	188.1	215.9
24	64.8	92.1	112.5	134.1	165.2	191.1	219.4

Tabella 1.1.a – Precipitazioni previste al variare delle durate e dei tempi di ritorno

Per l'applicazione del modello afflussi-deflussi all'intero bacino si sono utilizzati i dati ARPA distribuiti spazialmente, come illustrato nel paragrafo 2.4.3.

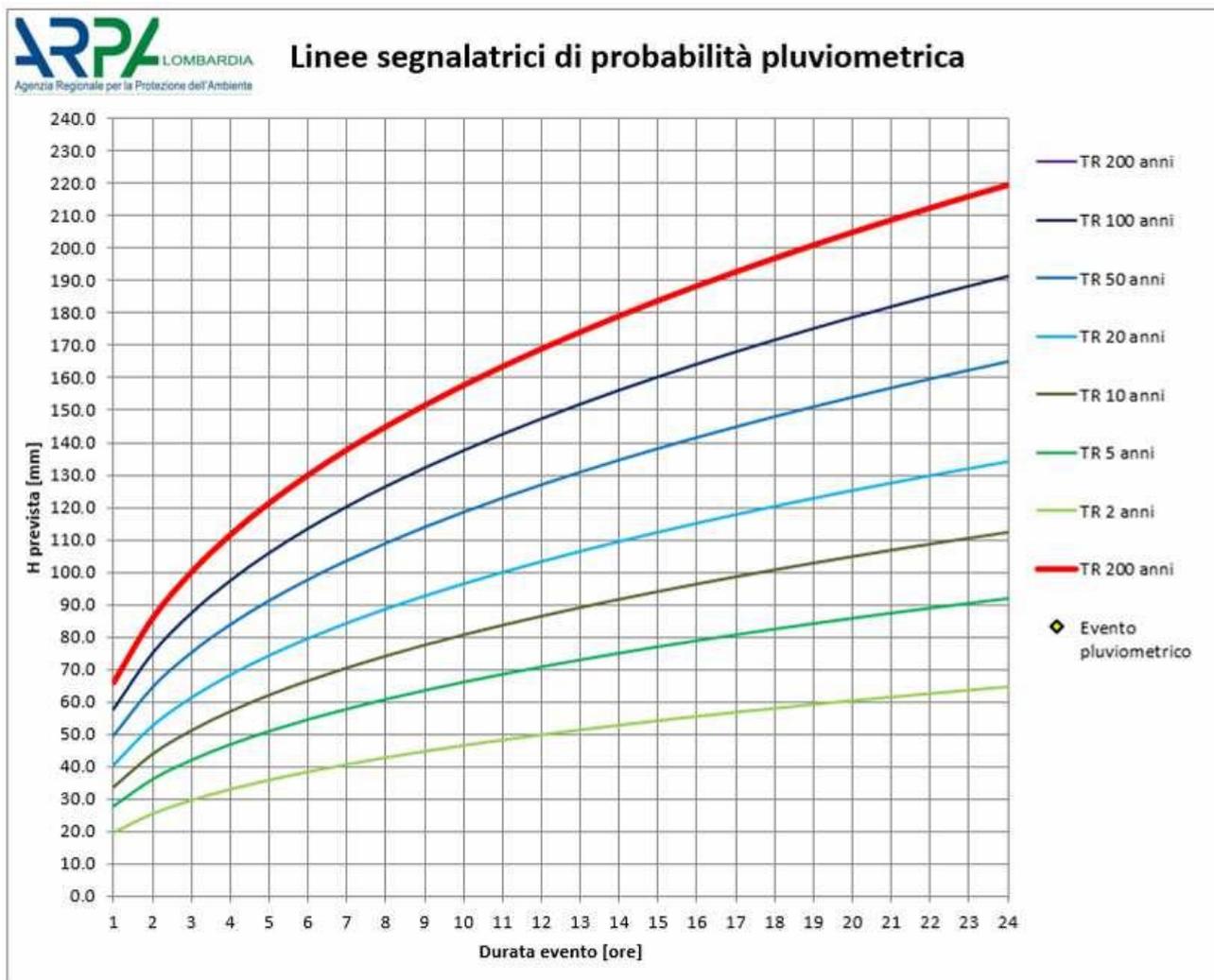


Figura 1.1.1 – Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica secondo metodologia ARPA Lombardia

	<i>a</i>	<i>n</i>
TR 2	19.54	0.377
TR 5	27.784	0.3773
TR 10	33.931	0.3772
TR 20	40.422	0.3773
TR 50	49.812	0.3773
TR 100	57.687	0.3769
TR 200	66.214	0.377

Tabella 1.1.b – Valori di *a* e *n* al variare dei tempi di ritorno per piogge di durata pari a 1 ora calcolati con la metodologia ARPA per la zona di Tirano (Fonte: Portale Idrologico Geografico di ARPA Lombardia)

2.2 SCROSCI

L'elaborazione dei dati di pioggia relativi agli eventi meteorici di breve durata e notevole intensità, scrosci prevede di ottenere le curve di possibilità relative agli scrosci a partire dalle curve di possibilità per piogge orarie (Bell).

2.2.1 METODO DI BELL

In bacini imbriferi di limitata estensione e di relativa rapidità dei deflussi, i tempi di concentrazione sono brevi e di conseguenza le precipitazioni che interessano sono le piogge intense di breve durata con tempi inferiore a 1 ora.

Generalmente le osservazioni relative alle piogge intense sono rilevate per intervalli di 1, 3, 6, 12 e 24 ore mentre sono raramente disponibili i dati relativi alle piogge intense per intervalli inferiori a 1 ora, anche per la connessa difficoltà della relativa registrazione accurata che si effettua con i pluviometri con registrazione su carta (pluviografi), che utilizzano per la registrazione una striscia settimanale.

Adottando i pluviografi che utilizzano per la registrazione una striscia giornaliera e i pluviometri digitali, il bilanciare consente l'accuratezza della lettura per piogge di massima intensità che si estende a intervalli dell'ordine del minuto: più breve è l'intervallo di discretizzazione, più dettagliata è la descrizione dell'evento pluviometrico, ma più onerosa risulta la gestione dell'informazione.

Peraltro, le informazioni relative alle piogge intense di breve durata non sono disponibili nella maggior parte delle stazioni pluviometriche, e per valutarle è opportuno adoperare particolari formule per la stima dell'intensità di pioggia, in quanto l'estrapolazione delle curve di probabilità pluviometrica a tempi inferiori ad un'ora conduce ad una sovrastima delle intensità.

Bell ("Generalized Rainfall Duration Frequency Relationships" -Journal of the Hydraulics Division Proceedings of American Society of Civil Engineers -volume 95, issue 1- gennaio 1969) ha osservato che i rapporti r_δ tra le altezze di durata t molto breve e inferiori alle due ore e l'altezza oraria so-no poco dipendenti dalla località in cui si verificano. Nelle tabelle seguenti sono riportati i parametri statistici negli Stati Uniti e in Australia, e il campo di variabilità di r_δ negli Stati Uniti e in Unione Sovietica.

Parametro	TEMPO DI PIOGGIA			
	5'	15'	20'	120'
Stati Uniti				
media	0,29	0,57	0,79	1,25
deviazione standard	0,03	0,04	0,04	0,08
Australia				
Tempo di ritorno 2 anni (media)	0,30	0,57	0,77	1,24
Tempo di ritorno 10 anni (media)	0,30	0,58	0,78	1,25
Tempo di ritorno 25 anni (media)	0,30	0,58	0,79	1,23
media	0,30	0,57	0,78	1,24
deviazione standard	0,04	0,04	0,03	0,06

Tabella 1.2.1.a: Rapporti tra i massimi annuali delle altezze di pioggia di diversa durata e la corrispondente altezza oraria negli Stati Uniti e in Australia (da: "Generalized rainfall duration frequency relationships" -Frederick Charles Bell -Journal of the Hydraulics Division – Proceedings of American Society of Civil Engineers -volume 95, issue 1, gennaio 1969 e Piogge intense – Guido Calenda – Deflussi Urbani -Giornate di studio 23-24/11 1995 Roma)

Parametro	TEMPO DI PIOGGIA			
	5'	15'	30'	120'
Stati Uniti				
Valore superiore	0,32	0,61	0,83	1,31
Valore inferiore	0,26	0,53	0,75	1,17
Unione Sovietica				
Valore superiore	0,37	0,60	0,87	1,40
Valore inferiore	0,26	0,49	0,70	1,20

Tabella 1.2.1.b: Intervalli di variazione dei rapporti tra massimi annuali delle altezze di pioggia di diversa durata e la corrispondente altezza oraria negli Stati Uniti e in Unione Sovietica (da: "Generalized rainfall duration frequency relationships" – F.C. Bell -Journal of the Hydraulics Division – Proceedings of American Society of Civil Engineers - volume 95, issue 1, gennaio 1969 e Piogge intense – Guido Calenda – Deflussi Urbani -Giornate di studio 23-24/11 1995 Roma)

Lo U.S. Water Bureau raccomanda per tempi di pioggia inferiore a mezz'ora l'adozione di una relazione empirica, derivata da dati di breve durata; tale relazione mostra che il tempo di pioggia in minuti ha un rapporto costante con la pioggia della durata di 1 ora per lo stesso tempo di ritorno:

t (minuti)	5'	10'	15'	30'
$r_{\delta} = h_{\delta}/h_{60}$	0,29	0,45	0,57	0,79

Tabella 1.2.1.c – relazione empirica U.S. Water Bureau

Questi rapporti variano molto poco negli stati Uniti ed i loro valori sono indipendenti dal periodo di ritorno. Bell, sulla scorta di osservazioni provenienti da oltre 150 stazioni con oltre 40 anni di osservazione, ha dimostrato che tale correlazione si può estendere sino ai valori di durata fino alle due ore e, come risulta dalla seguente figura, ha riscontrato la costanza dei rapporti tra tempo di pioggia breve e tempo di pioggia della durata pari ad un'ora, anche in Australia, Sud Africa, Hawaii, Alaska e Porto Rico.

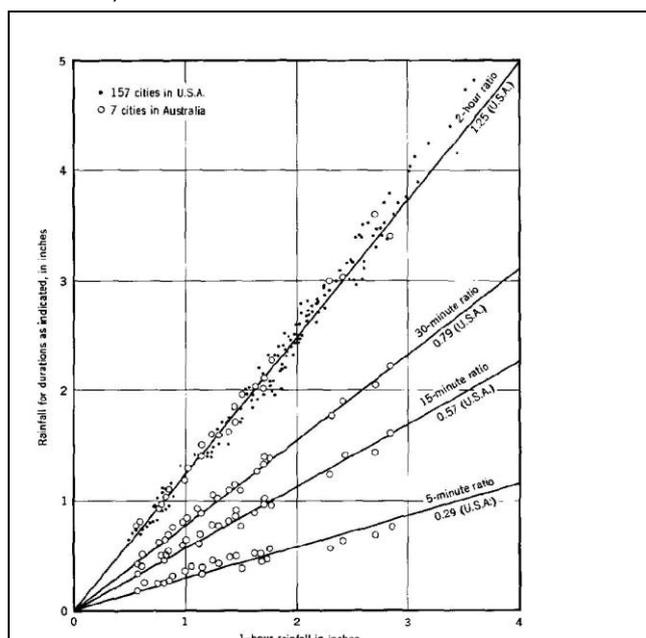


Figura 1.2.1.1: Depth -frequency relationship for 1 yr, 5 yr and 50 yr

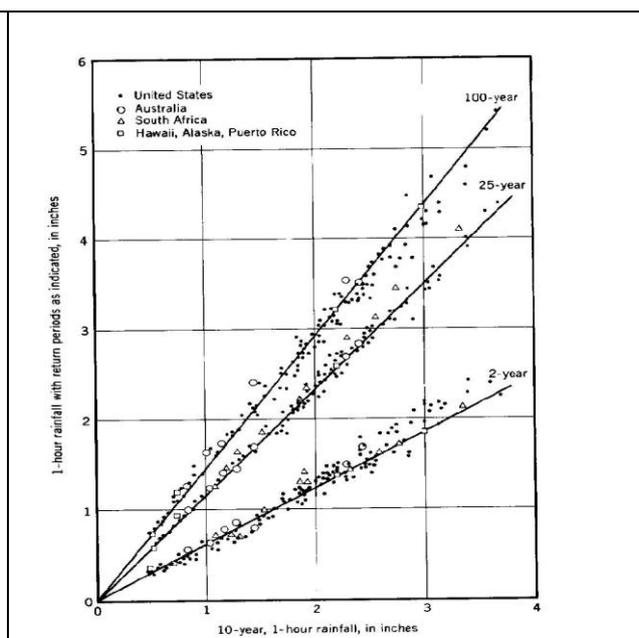


Figura 1.2.1.2: Depth -frequency relationship for 2 yr, 25 yr and 100 yr

Quindi, in relazione alla modesta variazione dei rapporti intensità durata correlata al tempo di ritorno, ha proposto la seguente relazione che ben si adatta ai dati osservati:

$$P_T^1 / h_T^{60} = (0.54) t^{0.25} - 0.5$$

Applicabile per $5 \leq t \leq 120$ minuti

- P_T^1 = altezza di pioggia relativa a un evento di durata pari a t riferita al periodo di ritorno T ;
- h_T^{60} = altezza di pioggia relativa a un evento di durata pari a t riferita al periodo di ritorno T ;
- t = tempo di pioggia espresso in minuti

Tali osservazioni sono state successivamente riprese da Calenda ("Piogge intense" – Deflussi Urbani – Giornate di Studio 23/24 novembre 1995, Roma, Associazione Idrotecnica Italiana), che ha osservato che gli stessi rapporti ottenuti dalla curva inviluppo delle massime piogge osservate nel mondo, di equazione $h_\delta = 390 \delta^{0.5}$, con δ in ore, risultano i seguenti (Jennings, 1950, Hershfield e Engman 1981):

δ (minuti)	5	10	15	20	30	45	120	240
$r_\delta = h_\delta / h_j$	0,29	0,41	0,50	0,58	0,71	0,87	1,41	2,00

Tabella 1.2.1.d – risultati applicazione formula di Bell

Sempre come riportato da Calenda, si è potuto osservare che al pluviometro registratore di Roma Macao su un campione di 8 anni sono stati calcolati i seguenti rapporti dei valori medi delle massime altezze di pioggia annue di diversa durata rispetto al valor medio della massima altezza oraria dell'anno (Domanico, 1986; Calenda et al, 1988):

δ (minuti)	5	10	15	20	25	30
$r_\delta = h_\delta / h_j$	0,278	0,435	0,537	0,632	0,709	0,758

Tabella 1.2.1.e – risultati applicazione formula di Bell

Al pluviografo di Milano Monviso, su un campione di 17 anni (Piga et al, 1990) sono stati calcolati i seguenti rapporti dei valori medi delle massime altezze di pioggia annue di diversa durata h_δ rispetto al valor medio della massima altezza annua oraria h_j e i corrispondenti rapporti dei valori massimi:

δ (minuti)	1	2	3	4	5	10	15	30	45
$r_\delta = h_\delta / h_j$	0,13	0,18	0,22	0,27	0,32	0,48	0,60	0,81	0,91
$r_{\delta m} = h_{\delta m} / h_{jm}$	0,15	0,17	0,21	0,24	0,30	0,44	0,56	0,70	0,79

Tabella 1.2.1.f – risultati applicazione formula di Bell

Applicando ora la formula di Bell sopra indicata, si ottengono i seguenti risultati:

$$r_s = (0,54 t^{0.25} - 0,5)$$

δ (minuti)	5	10	15	20	25	30	40	45	50
rs	0,307	0,460	0,563	0,642	0,707	0,764	0,858	0,899	0,936

Tabella 1.2.1.g – risultati applicazione formula di Bell

I valori ottenuti utilizzando l'equazione di Bell si discostano quindi di poco dai valori riscontrati sperimentalmente anche in Italia sopra riportati e si possono considerare affidabili per il calcolo delle precipitazioni per periodi inferiori a 1 ora.

In conclusione ai fini della valutazione delle altezze di pioggia nei bacini con tempo di corrivazione inferiore ad 1 ora si adotta la seguente relazione:

$$h_{t\ 60} = \beta h$$

con

$$\beta = (0,54 t^{0,25} - 0,5)$$

2.2.2 CALCOLO DELLA CURVA DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA PER GLI EVENTI DI PIOGGE INTENSE DI BREVE DURATA CON IL METODO DI BELL

A partire dai dati ottenuti con l'elaborazione descritta nel precedente paragrafo per le piogge di durata pari all'ora, basata sui parametri e sulla formulazione proposti da ARPA Lombardia tramite il proprio Portale Idrologico Geografico, si è applicato il Metodo di Bell precedentemente descritto.

	<i>a</i>	<i>n</i>
TR 2	19.54	0.377
TR 5	27.784	0.3773
TR 10	33.931	0.3772
TR 20	40.422	0.3773
TR 50	49.812	0.3773
TR 100	57.687	0.3769
TR 200	66.214	0.377

Tabella 1.2.2.a: Valori di *a* e *n* al variare dei tempi di ritorno per piogge di durata pari ad 1 ora calcolati con la metodologia ARPA (Fonte: Portale Idrologico Geografico di ARPA Lombardia)

Tp	b(t)*h(t60)										
	5	10	15	20	25	30	40	45	50	55	59
TR 2	6.008	8.994	10.995	12.544	13.824	14.924	16.766	17.559	18.288	18.965	19.474
TR 5	8.543	12.788	15.634	17.836	19.657	21.221	23.839	24.967	26.004	26.966	27.690
TR 10	10.433	15.617	19.093	21.782	24.005	25.916	29.114	30.491	31.757	32.932	33.816
TR 20	12.429	18.605	22.746	25.949	28.598	30.874	34.683	36.324	37.833	39.232	40.285
TR 50	15.317	22.927	28.030	31.977	35.241	38.046	42.740	44.762	46.621	48.346	49.643
TR 100	17.738	26.552	32.461	37.033	40.812	44.061	49.497	51.838	53.992	55.989	57.491
TR 200	20.360	30.476	37.260	42.507	46.845	50.573	56.813	59.501	61.972	64.265	65.989

Tabella 1.2.2.b: Risultati dell'applicazione del Metodo di Bell per il calcolo dell'altezza di pioggia

Dai dati della precedente tabella si sono ottenuti i seguenti valori dei coefficienti della curva di possibilità pluviometrica relativa agli scrosci:

	<i>a</i>	<i>n</i>
TR 2	20.203	0.4636
TR 5	28.727	0.4636
TR 10	35.083	0.4636
TR 20	41.794	0.4636
TR 25	44.085	0.4636
TR 50	51.503	0.4636
TR 100	59.645	0.4636
TR 200	68.462	0.4636

Tabella 1.2.2.c: Parametri *a* e *n* ottenuti con l'applicazione del Metodo di Bell per precipitazioni di breve durata

In conclusione, relativamente ai tempi di ritorno di 25, 50 e 100 anni (di riferimento per la stima dell'altezza di pioggia da utilizzarsi nel dimensionamento delle opere di captazione e allontanamento delle acque di piattaforma e per fossi di guardia e tombini di attraversamento) si sono ottenuti i seguenti risultati.

	TR 25	TR50	TR 100
a	44.085	51.503	59.645
n	0.4636	0.4636	0.4636
Durata precipitazione	Altezza precipitazione	Altezza precipitazione	Altezza precipitazione
[minuti]	[mm]	[mm]	[mm]
5	13.111	15.317	17.738
10	19.625	22.927	26.552
15	23.993	28.030	32.461
20	27.372	31.977	37.033
25	30.165	35.241	40.812
30	32.566	38.046	44.061
40	36.585	42.740	49.497
45	38.315	44.762	51.838
50	39.907	46.621	53.992
55	41.383	48.346	55.989
59	42.493	49.643	57.491

Tabella 1.2.2.d: Curve di possibilità pluviometrica per gli eventi di breve durata per TR = 25, 50 e 100 anni.

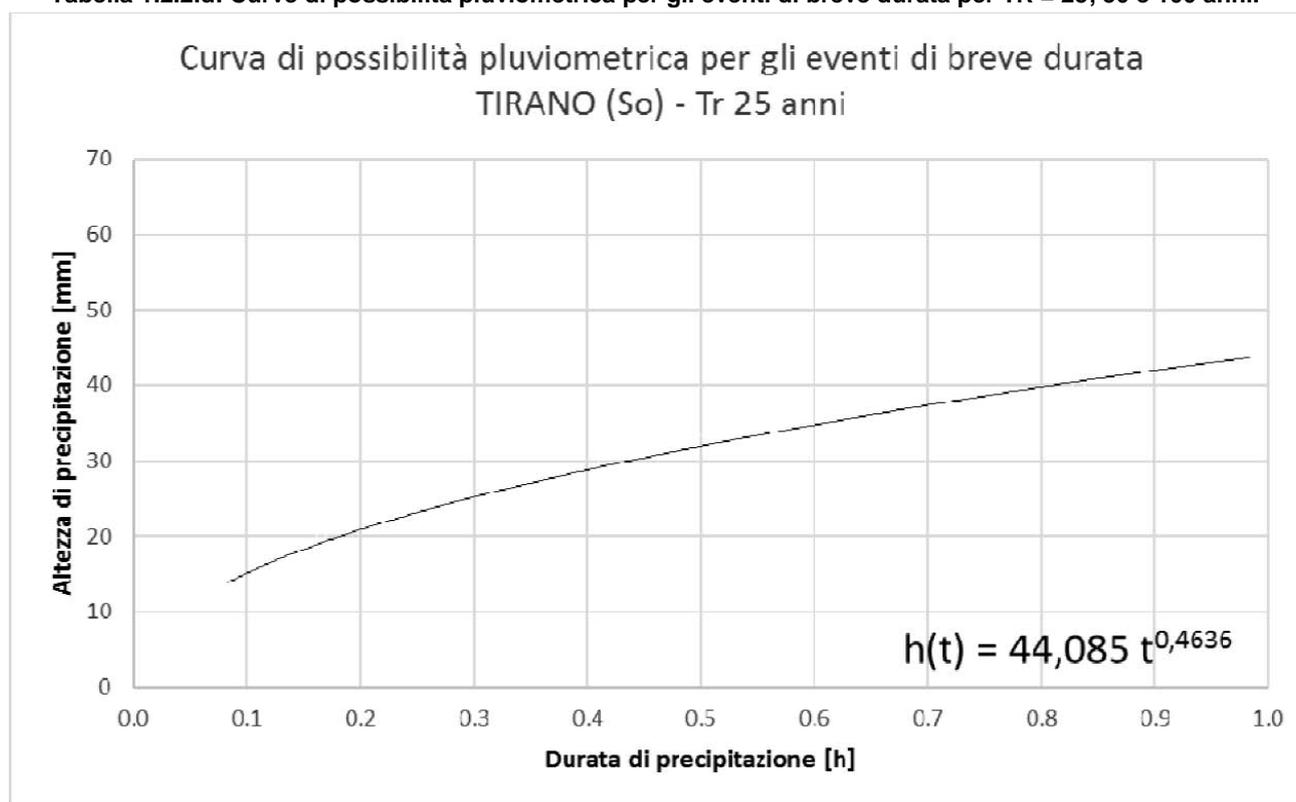


Figura 1.2.2.1: Curva di possibilità pluviometrica per gli eventi di breve durata per TR = 25 anni

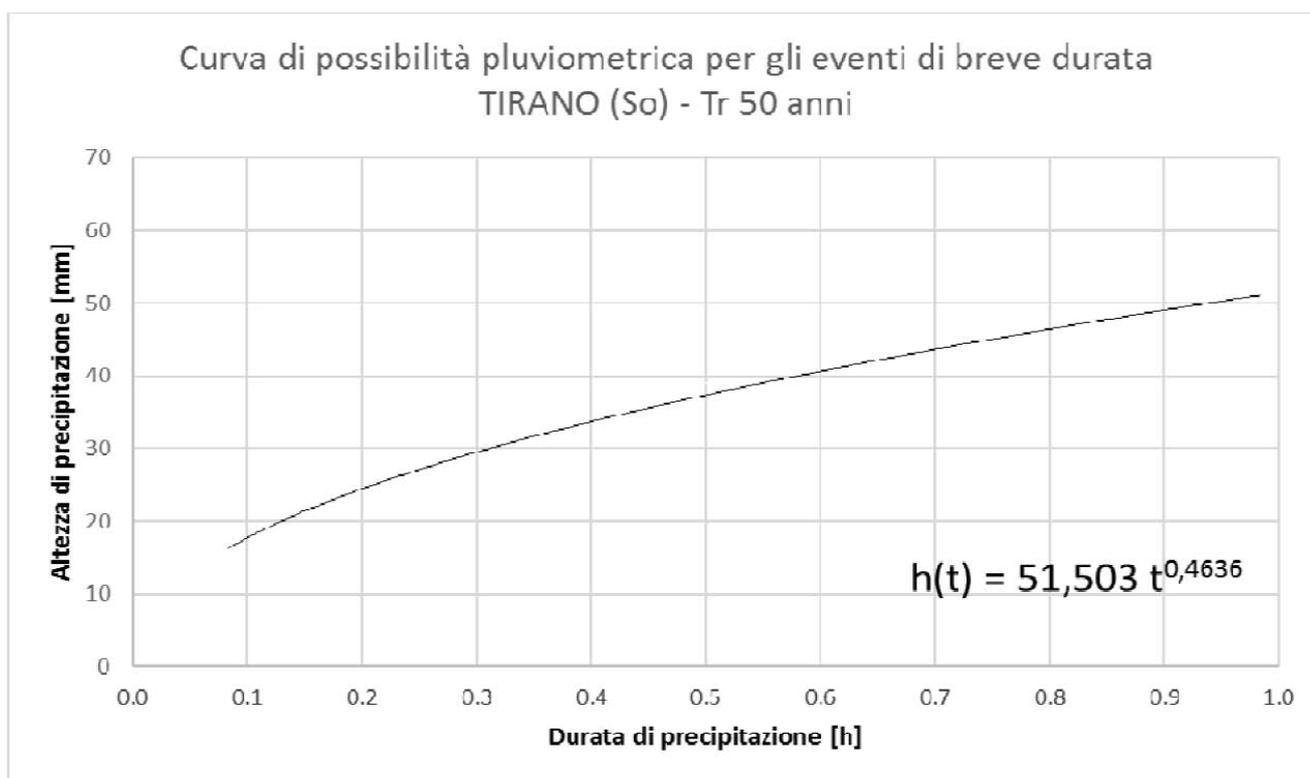


Figura 1.2.2.2: Curva di possibilità pluviometrica per gli eventi di breve durata per TR = 50 anni

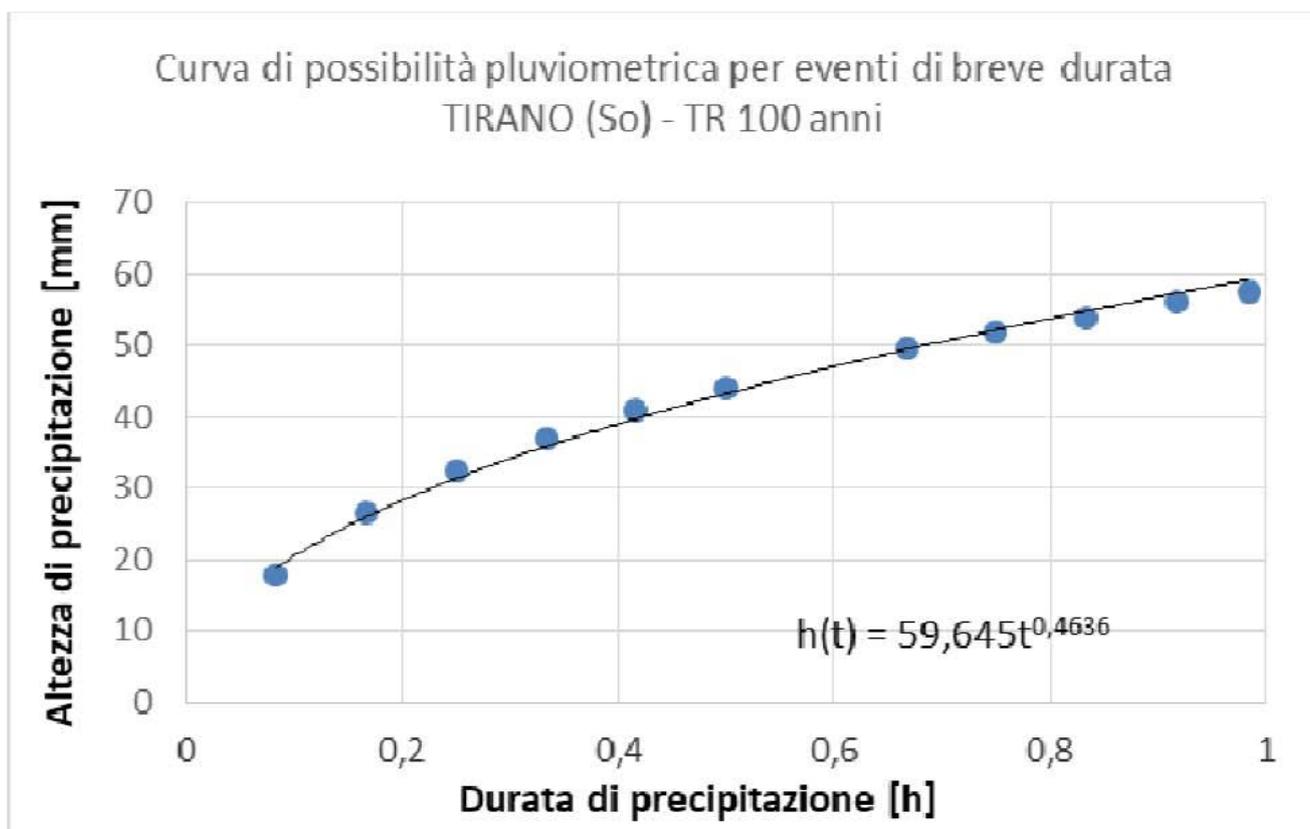


Figura 1.2.2.3: Curva di possibilità pluviometrica per gli eventi di breve durata per TR = 100 anni

2.3 PIOGGE DI PROGETTO

Alla luce di quanto ottenuto dalle analisi descritte nei precedenti paragrafi si sintetizza che:

- l'elaborazione delle piogge orarie relative alla zona di Tirano ha portato ai seguenti valori di progetto dei parametri a e n :

	a	n
TR 2	19.54	0.377
TR 5	27.784	0.3773
TR 10	33.931	0.3772
TR 20	40.422	0.3773
TR 50	49.812	0.3773
TR 100	57.687	0.3769
TR 200	66.214	0.377

Tabella 1.3.a: Valori di a e n al variare dei tempi di ritorno per piogge di durata superiore ad 1 ora calcolati con la metodologia ARPA (Fonte: Portale Idrologico Geografico di ARPA Lombardia)

- l'elaborazione delle piogge suborarie (scrosci) sviluppata usando il metodo di Bell , i cui risultati sono stati utilizzati sia per la progettazione dei tombini di attraversamento del rilevato stradale che per la progettazione delle opere di raccolta e smaltimento delle acque di piattaforma, ha fornito:

	TR 25	TR 50	TR 100
a	44.085	51.503	59.645
n	0.4636	0.4636	0.4636

Tabella 1.3.b: Curve di possibilità pluviometrica per eventi di breve durata per TR = 25, 50 e 100 anni

3 DETERMINAZIONE DELLA PORTATA DI PIENA DI PROGETTO NEL TRATTO DI FIUME ADDA INTERESSATO DALLE OPERE

Per la determinazione della portata di piena di progetto lungo il fiume Adda nel tratto interferente con i lavori si è fatto riferimento in primo luogo a numerosi studi pregressi, dei quali si riporta nel seguito un breve estratto, per poi procedere con un'autonoma analisi idrologica al fine di giungere a dei valori attendibili da utilizzarsi per il dimensionamento delle opere e per le verifiche di compatibilità idraulica.

3.1 STUDI PREGRESSI CONSIDERATI NELLA PRECEDENTE FASE PROGETTUALE

Nel presente paragrafo si riportano in sintesi i risultati ottenuti dai seguenti studi:

- 1 Studio del Prof. Ing. Silvio Franzetti, commissionato dalla Comunità Montana Alta Valtellina (1984);
- 2 Studio di CAE-ISMES, commissionato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Regione Lombardia (1988);
- 3 Studio di fattibilità della sistemazione idraulica e di versante (Val di Pola) redatto dalla Soc. Italteknà, commissionato dalla Regione Lombardia (1989);
- 4 Calcoli idrologici per il "Piano e programma di ricostruzione, riconversione e sviluppo della Valtellina, delle zone adiacenti delle province di Como, Bergamo e Brescia colpite dalle avversità atmosferiche dei mesi di luglio-agosto 1987", commissionato dalla Regione Lombardia (redatto da ATI di cui Società Italteknà era mandataria – 1990);
- 5 Studio della Soc. Hydrodata, commissionato dal Ministero dei Lavori Pubblici -Magistrato per il Po (1997);
- 6 Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI);
- 7 Studio della Pro.i.ter. s.r.l. et al. per Regione Lombardia e A.N.A.S per la progettazione della variante di Tirano della SS 38 (2003);
- 8 Studio AIPo-Agenzia Interregionale per il fiume Po (2008).

3.1.1 STUDIO DEL PROF. ING SILVIO FRANZETTI, COMMISSIONATO DALLA COMUNITÀ MONTANA ALTA VALTELLINA (1984)

Lo studio commissionato dalla Comunità Montana dell'Alta Valtellina di Tirano nel 1984 al Prof. Ing. Silvio Franzetti è relativo alla tratta fluviale dell'Adda da Premadio (a monte di Bormio) fino a Chiuro: la zona si sovrappone, pertanto, a quella di interesse nel tratto Tirano -Villa di Tirano.

Le stazioni idrometrografiche utilizzate per l'analisi idrologica sono: Tirano ($S=906 \text{ km}^2$) e Fuentes ($S=2598 \text{ km}^2$) sul Fiume Adda, S. Caterina Valfurva ($S=106 \text{ km}^2$) sul T. Frodolfo.

I dati utilizzati e le fonti sono i seguenti:

- per l'Adda a Fuentes, i massimi annui di portata al colmo nel periodo 1927-1968 riportati sulle pubblicazioni del S.I.I. "Dati caratteristici dei corsi d'acqua italiani" (Tabella 2.1.1a);

ANNO	Qc [m ³ /s]	ANNO	Qc [m ³ /s]
1927	1160	1948	1060
1928	860	1949	225
1929	502	1950	334
1930	517	1951	878
1931	517	1952	715
1932	581	1953	475
1933	688	1954	820
1934	429	1955	556
1935	1000	1956	779
1936	525	1957	744
1937	930	1958	643
1938	418	1959	248
1939	759	1960	1070
1940	502	1961	523
1941	443	1962	280
1942	863	1963	488
1943	329	1964	311
1944	510	1965	942
1945	541	1966	271
1946	682	1967	305
1947	457	1968	670

Tabella 2.1.1.a: Stazione idrometrografica di Fuentes: portate al colmo massime annuali [m³/s]

- per l'Adda a Tirano, i massimi annui di portata al colmo nel periodo 1925-1937 riportati sulle medesime pubblicazioni, integrati dai dati rilevati a cura dell'A.E.M. di Milano negli anni 1958-1981 (Tabella 2.1.1b);

ANNO	Qc [m ³ /s]	DATI	ANNO	Qc [m ³ /s]	DATI	ANNO	Qc [m ³ /s]	DATI
1925	95,5	S.I.I.	1937	404	S.I.I.	1969	140	A.E.M.
1926	540	S.I.I.	1958	260	A.E.M.	1970	170	A.E.M.
1927	190	S.I.I.	1959	85	A.E.M.	1971	160	A.E.M.
1928	217	S.I.I.	1960	600	A.E.M.	1972	170	A.E.M.
1929	92	S.I.I.	1961	230	A.E.M.	1973	215	A.E.M.
1930	123	S.I.I.	1962	150	A.E.M.	1974	120	A.E.M.
1931	139	S.I.I.	1963	160	A.E.M.	1975	200	A.E.M.
1932	133	S.I.I.	1964	145	A.E.M.	1976	280	A.E.M.
1933	174	S.I.I.	1965	200	A.E.M.	1977	210	A.E.M.
1934	113	S.I.I.	1966	100	A.E.M.	1978	170	A.E.M.
1935	291	S.I.I.	1967	130	A.E.M.	1980	305	A.E.M.
1936	186	S.I.I.	1968	340	A.E.M.	1981	275	A.E.M.

Tabella 2.1.1.b: Stazione idrometrografica di Tirano: portate al colmo massime annuali [m³/s]

- per il Frodolfo a S. Caterina Valfurva, i massimi annui di portata al colmo nel periodo 1935-1940 riportati sulle pubblicazioni del S.I.I. "Dati caratteristici dei corsi d'acqua italiani".

ANNO	Qc [m ³ /s]
1935	47.50
1936	32.50
1937	27.10
1938	38.80
1939	57.40
1940	36.70

Tabella 2.1.1.c: Stazione idrometrografica di S. Caterina (Frodolfo): portate al colmo massime annuali [m³/s]

Quest'ultima stazione, data la carenza di informazioni per essa disponibili (6 anni), è stata utilizzata solo come test di verifica della formula di regionalizzazione.

Le procedure di stima del dato puntuale sono basate sulle consuete elaborazioni statistiche: stima dei parametri di alcune distribuzioni (Gumbel e log-normale) e test di adattamento di Pearson. In Tabella 18 sono riportati i risultati ottenuti in termini di portata al colmo per vari tempi di ritorno nelle stazioni di Tirano e Fuentes.

T (anni)	Stazione idrometrografica di Tirano (S = 906 km ²) Qc [m ³ /s]	Stazione idrometrografica di Fuentes (S = 2598 km ²) Qc [m ³ /s]
2	175	564
5	286	783
10	370	929
20	458	1070
50	581	1256
100	682	1396
1000	1065	1881

Tabella 2.1.1.d: Portate al colmo per le stazioni di Tirano e Fuentes

Il metodo di regionalizzazione è basato sulla ricerca dei parametri k e δ dell'espressione

$$Q(T) = k(T) \cdot S$$

ove $Q(T)$ è la portata al colmo di assegnato tempo di ritorno T ed S la superficie del bacino drenato. Poiché si è ammesso che entrambi i parametri possano variare con il tempo di ritorno T e le stazioni con dati disponibili sono solamente due, è possibile determinare immediatamente k e δ (per ogni tempo di ritorno).

T	K	δ
2	0,091	1,111
5	0,426	0,956
10	0,964	0,874
20	1,901	0,805
50	3,982	0,732
100	6,652	0,680
1000	26,953	0,540

Tabella 2.1.1.e: Regionalizzazione dei deflussi di piena

La regionalizzazione risulta, però, incerta a causa della scarsa mole di dati puntuali utilizzabili rispetto ai parametri da stimare (2 per ogni tempo di ritorno); ancor più incerta è l'estrapolazione dei risultati a bacini di area inferiore a quella della prima stazione di misura (Tirano), come risulta dal confronto tra il dato regionalizzato e quello derivante dall'elaborazione dei pochi dati alla stazione di S. Caterina Valfurva.

Nello studio, poiché si è verificata la relativa affidabilità delle valutazioni effettuate (soprattutto per le portate al colmo con tempo di ritorno basso e sui bacini di modeste dimensioni), sono stati apportati correttivi alle portate ottenute con l'analisi descritta giungendo alla definizione delle portate di progetto di Tabella 2.1.1.f, che tuttavia non risultano correlabili direttamente ad un prefissato tempo di ritorno.

Sezione di chiusura del bacino	S [km ²]	Abb. frequente	Rara	Eccezionale
Sondalo a valle confluenza Rezzolasco	585	300	510	780
Grosio a monte confluenza Roasco	655	320	550	800
Grosio a valle confluenza Roasco	797	350	600	850
Tirano a monte confluenza Poschiavino	906	360	610	900
Tirano a valle confluenza Poschiavino	1156	450	750	1100
Chiuro a monte confluenza Val Fontana	1341	500	830	1200
Chiuro a valle confluenza Val Fontana	1403	530	850	1250

Tabella 2.1.1.f: Portate al colmo di progetto [m³/s]

3.1.2 STUDIO DI CAE-ISMES, COMMISSIONATO DAL DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE E DALLA REGIONE LOMBARDIA (1988)

Lo studio commissionato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Regione Lombardia all'ISMES e alla CAE è relativo alla definizione delle Mappe a Rischio Uniforme di Inondazione nella tratta fluviale dell'Adda da Le Prese fino a poco oltre Sondrio (a valle della confluenza con il T. Mallero).

Le stazioni idrometrografiche utilizzate per l'analisi idrologica sono quelle di S. Lucia ($S=246 \text{ km}^2$), Tirano ($S=906 \text{ km}^2$), S. Giacomo di Teglio ($S=1333 \text{ km}^2$) e Fuentes ($S=2598 \text{ km}^2$) sul Fiume Adda. I dati idrometrografici sono stati letti direttamente dalle strisce che contengono le registrazioni originali e trasformati in portate sulla base della serie storica di scale di deflusso relative a ciascuna sezione. Le portate al colmo utilizzate sono tutte quelle eccedenti una soglia assegnata, assunta uguale al 30% del valore medio dei massimi annuali di portata al colmo. I periodi considerati sono i seguenti:

- Adda a S. Lucia: settembre 1939 -dicembre 1944; novembre 1946 -settembre 1960, per un totale di 154 piene;
- Adda a Tirano: gennaio 1926 - dicembre 1941, per un totale di 122 piene;
- Adda a S. Giacomo di Teglio: ottobre 1957 - maggio 1983, per un totale di 144 piene;
- Adda a Fuentes: marzo 1927 - gennaio 1951; maggio 1953 - dicembre 1972; gennaio 1974 - dicembre 1981, per un totale di 465 piene.

Le procedure di stima del dato puntuale sono state condotte mediante elaborazioni statistiche basate sul metodo delle eccedenze. La stima della portata Q che corrisponde ad un tempo di ritorno T assegnato varia al variare del valore attribuito alla soglia; nello studio, per ciascuna delle serie considerate, si sono condotte quattro elaborazioni corrispondenti a quattro diversi valori della portata di soglia.

Come stima della portata $Q(T)$ si è scelta quindi la media pesata delle stime ottenute per i diversi valori della soglia; la media pesata è stata calcolata assumendo come pesi i numeri dei colmi ottenuti per i diversi valori di soglia. È stato, infine, effettuato un confronto con la consueta analisi dei massimi annui (distribuzione Gamma) trovando risultati molto vicini tra loro; tale risultato conferma come l'aggiunta di valori diversi dai massimi annui alle serie storiche per il calcolo delle portate al colmo non produce apprezzabili miglioramenti al livello di determinazione. In Tabella 2.1.2.a sono riportate le portate al colmo stimate nelle quattro stazioni.

T [anni]	S. Lucia (mc/s)	Tirano (mc/s)	S.G. Teglio (mc/s)	Fuentes (mc/s)
100	129	409	485	1383
200	140	451	532	1528
500	156	507	595	1721
1000	169	549	644	1870

Tabella 2.1.2.a: Portate al colmo con assegnato tempo di ritorno per le quattro stazioni dell'Adda in Valtellina
[m³/s]

Il metodo di regionalizzazione adottato nello studio in oggetto è basato sulla semplice interpolazione lineare dei contributi specifici di piena ottenuti per le quattro stazioni idrometrografiche per i tempi di ritorno di 100, 200, 500 e 1000 anni. Viene segnalato, come già riscontrato da altri ricercatori, che il contributo specifico di piena diminuisce regolarmente da S. Lucia fino a S. Giacomo di Teglio, per poi aumentare da S. Giacomo a Fuentes; quest'ultimo comportamento, apparentemente anomalo, è giustificato dalla più intensa pluviometria del basso bacino dell'Adda sovrallacuale: i valori delle portate al colmo con assegnato tempo di ritorno, per le nove sezioni considerate nello studio come base di calcolo, sono riportati nella Tabella 2.1.2.b.

Sezione di chiusura del bacino	S [km ²]	PORTATA AL COLMO Tr [anni]:			
		100	200	500	1000
Le Prese N. 100	551	270	295	331	358
Mondadizza N. 95	597	290	317	355	384
Sondalo N. 91	621	300	329	368	398
Grossotto (a valle confluenza Roasco) N. 74	813	375	413	463	502
Stazzona (a valle confl. Poschiavino) N. 55	1293	481	528	591	639
Chiuro (a monte confluenza Armisa) N.33	1417	531	582	652	707
Sondrio (a valle confluenza Venina) N. 13	1580	627	689	771	836
Sondrio (a valle confluenza Mallerio) N. 1	1931	855	942	1058	1148

Tabella 2.1.2.b: Portate di piena al colmo ricavate dalla regionalizzazione [m³/s]

3.1.3 STUDIO DI FATTIBILITÀ DELLA SISTEMAZIONE IDRAULICA E DI VERSANTE (VAL DI POLA) REDATTO DALLA SOC. ITALTEKNA, COMMISSIONATO DALLA REGIONE LOMBARDIA (1989)

Nell'ambito dello studio di fattibilità sono state effettuate elaborazioni idrologiche sia sulla base di modelli di similitudine idrologica sia sulla base di modelli di trasformazione afflussi – deflussi; per quanto concerne la prima metodologia, si è fatto riferimento alla seguente formulazione:

$$Q = Q_{100} (S/100)^{-\alpha}$$

opportunamente tarata in funzione dei dati pluviometrici e idrometrici disponibili.

Per quanto riguarda l'applicazione del metodo di trasformazione afflussi-deflussi si sono utilizzati il metodo SCS-CN e un modello di trasformazione afflussi netti -deflussi con IUH alla Nash e ietogramma costante (modello 1) o ietogramma Chicago (modello 2).

I risultati ottenuti con i due metodi sono riportati nella successiva Tabella 2.1.3.a.

Tempo di ritorno [anni]	Similitudine idrologica α = 1/2	Similitudine idrologica α = 2/3	Modello afflussi – deflussi 1	Modello afflussi – deflussi 2
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
2	186	245	150	257
5	253	333	219	322
10	297	391	270	366
20	354	465	337	422
50	395	519	388	462
100	434	571	438	500
200	475	625	492	541
500	529	696	564	594
1000	569	748	619	634

Tabella 2.1.3.a: Portate di piena al colmo dell'Adda alla sezione della Val Pola [m³/s]

3.1.4 CALCOLI IDROLOGICI PER IL "PIANO E PROGRAMMA DI RICOSTRUZIONE, RICONVERSIONE E SVILUPPO DELLA VALTELLINA, DELLE ZONE ADIACENTI DELLE PROVINCE DI COMO, BERGAMO E BRESCIA COLPITE DALLE AVVERSITÀ ATMOSFERICHE DEI MESI DI LUGLIO-AGOSTO 1987", COMMISSIONATO DALLA REGIONE LOMBARDIA (1990)

Lo studio commissionato dalla Regione Lombardia ad un'associazione temporanea di imprese di cui l'Italtekna era la mandataria è relativo alla definizione delle Mappe a Rischio Uniforme di Inondazione per i Fiumi Adda, Brembo ed Oglio; le mappe relative al Fiume Adda si estendono da Sondrio allo sbocco nel lago di Como e quindi risultano di interesse per il progetto della nuova SS38.

L'analisi idrologica è basata sui medesimi dati già esposti per lo studio CAE-ISMES (vedasi precedente paragrafo 2.1.2).

Le procedure di stima del dato puntuale sono basate sia sull'elaborazione dei massimi annui (considerando otto distribuzioni di probabilità) che sul metodo delle eccedenze; per ognuna di queste distribuzioni si è valutato il livello di significatività. I valori di portata al colmo ottenuti, per assegnato tempo di ritorno, non si discostano significativamente, per le stazioni considerate, da quelli riportati nello studio CAE-ISMES; differente è, invece, il criterio di definizione delle portate di progetto, scelte come quelle che hanno probabilità di superamento del 10% in 100 anni: tali valori risultano intermedi tra i valori attesi con tempi di ritorno di 200 e 500 anni (Tabella 2.1.4.a).

Stazione	T = 100 (Super. 10%)	T = 200	T = 500
Adda a S. Lucia	157	159	178
Adda a Tirano	500	442	488
Adda a Fuentes	1633	1553	1738
Bitto e Gerola	51	53	59

Tabella 2.1.4.a: Portate di piena al colmo [m³/s]

Il metodo di regionalizzazione adottato è basato sulla ricerca dei parametri di una regressione del tipo:

$$u = k \cdot (P_{100})^a \cdot A^b \cdot H^c$$

nella quale:

- u è il contributo specifico di piena in m³/s (km²);
- P_{100} è la media (effettuata sui pluviometri distribuiti nel bacino sotteso) dei valori centenari delle piogge giornaliere (in dm);
- A è l'area totale (in centinaia di km²) del bacino;
- H è la quota (in m s.l.m.) della sezione di interesse;
- k, a, b, c sono i coefficienti della regressione.

La regressione risultante (comprendente anche sezioni di misura ricadenti nel bacino del Brembo) è la seguente:

$$u = 2,2513 \cdot (P_{100})^{2,341} \cdot A^{0,405} \cdot H^{-0,674}$$

I valori finali delle portate con probabilità di superamento del 10% in 100 anni, per le nove sezioni base prescelte, sono riportati nella Tabella 2.1.4.b.

Sezione	S [km ²]	Qc [m ³ /s]
Sondrio N.83 (a valle confluenza Mallero)	1597	1042
S. Pietro Berb. N.67 (a monte confluenza Madrasco)	2085	1242
S. Pietro Berb. N. 66 (a valle confluenza Madrasco)	2114	1265
Ardenno N.55 (a monte confluenza Masino)	2140	1282
Ardenno N.54 (a valle confluenza Masino)	2303	1316
Talamona N.50 (a valle confluenza Tartano)	2333	1357
Morbegno N.35 (a monte confluenza Bitto)	2399	1512
Morbegno N.34 (a valle confluenza Bitto)	2490	1555
S. Agata N. 7	2598	1633

Tabella 2.1.4.b: Portate di piena al colmo ricavate dalla regionalizzazione [m³/s]

3.1.5 STUDIO DELLA SOC. HYDRODATA, COMMISSIONATO DAL MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI – MAGISTRATO PER IL PO (1997)

Lo studio è stato redatto a base della progettazione del lotto di completamento delle opere di adeguamento della sezione di deflusso e di consolidamento delle opere spondali in comune di Tirano. In esso, le portate di piena sono state assunte facendo riferimento ai dati risultanti dalle regolarizzazioni delle serie storiche di portata massima al colmo disponibili nelle sezioni di Tirano e Fuentes; si sono, inoltre, applicati dei metodi di valutazione del tipo empirico per la ricerca di valori maggioranti delle portate di piena, onde confrontare le risultanze della procedura statistica.

Lo stesso studio ha proceduto ad una valutazione delle piene mediante un modello di regionalizzazione derivato dall'elaborazione dei dati relativi alle stazioni presenti nell'intero bacino del Po, con tecniche di regressione multipla eseguite all'interno del progetto S.I.M.P.O. (Magistrato per il Po - S.I.M.P.O. H.C. Hydrodataconsult: Studio e progettazione di massima delle sistemazioni idrauliche), per un tempo di ritorno di 50 anni. I valori così ottenuti risultano superiori a quelli calcolati mediante l'uso dell'altro metodo di regionalizzazione, più specifico, dando ragione del fatto che il bacino esaminato presenta caratteristiche di potenzialità di piena e di impulsività degli eventi critici inferiori rispetto al comportamento medio di altri bacini dell'arco alpino e che, come già accennato in precedenza, la piovosità nella parte alta (a monte di Tirano) è inferiore rispetto a quella della parte bassa della Valtellina. Per le stesse motivazioni, anche l'uso di metodi deterministici per la stima di valori di portata maggioranti rispetto ai dati storici ha condotto a stime di portata superiori a quelle derivanti dall'uso diretto dei dati di Tirano e Fuentes. Quanto sopra è espresso, per massima comodità di consultazione, nella tabella seguente, nella quale sono riportati i risultati dei vari metodi di stima delle portate al colmo per le sezioni di interesse, quella chiusa all'idrometro di Tirano, e quella chiusa all'inizio del tratto cittadino, all'altezza del campo sportivo.

Sezione	Interpolazione Tr = 100 anni	Metodo S.I.M.P.O. Tr = 50 anni	Trasposizione max evento	Metodo empirico C.N.R	Metodo empirico S.F.R.D. (CH)
Tirano Idrometro	584	606	600	738	1264
Tirano campo sportivo	591	611	-	744	1271

Tabella 2.1.5.a: Portate di piena al colmo dell'Adda alle sezioni di Tirano Idrometro e Tirano campo sportivo [m³/s]

Infine, lo studio ha valutato gli effetti di scarichi concentrati dal lago di Pola, il quale induce senz'altro una variazione significativa delle condizioni del bacino, in termini di consistenza idrologica; come è noto, il lago si è formato proprio in concomitanza della tremenda e tragica frana della Val di Pola, durante l'evento 1987.

Lo studio Hydrodata, a tale fine, valuta come cautelativa la sovrapposizione dei seguenti effetti:

- scarico della portata massima dalle condotte di by-pass del lago di Pola (500 m/s) per effetto di manovre o situazioni particolari dovuti ad occlusione temporanea, ecc.;
- piena centenaria nel bacino con chiusura alla sezione di Tirano;
- perfetta sovrapposibilità dell'onda di piena naturale con lo scarico massimo dal lago;
- assenza di effetti di laminazione in alveo, giungendo a determinare la portata massima in Adda a Tirano in 750 m/s, affermando comunque che tale valore corrisponde ad un tempo di ritorno difficilmente stimabile con precisione, ma comunque nettamente superiore ai 100 anni.

3.1.6 PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (PAI)

L'Autorità di Bacino del fiume Po, all'interno del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI - adottato con Deliberazione del Comitato Istituzionale n.1 d.d. 11.05.1999) e delle direttive da esso derivate, definisce i valori di precipitazione intensa e di portata, per diversi tempi di ritorno, sulle varie aree del bacino del fiume Po.

La "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica" (Direttiva n.2) fornisce, inoltre, le serie storiche di pioggia intensa e di portata pubblicate sugli Annali Idrologici del Servizio Idrografico, a partire dalle quali si sono costruite le caratterizzazioni idrologiche e idrauliche per diversi tempi di ritorno, le loro distribuzioni spaziali sul territorio secondo metodi di regionalizzazione e la modellazione idrodinamica per la piena di riferimento con tempo di ritorno 200 anni. Per gli affluenti principali, tra cui anche l'Adda nel tratto sopralacuale, la Direttiva citata indica i valori delle portate di piena lungo i vari corsi d'acqua per diverse sezioni e con riferimento a tempi di ritorno pari a 20, 100, 200 e 500 anni; tali valori, presenti nella Tabella 5 della Direttiva n. 2, sono riportati nella successiva Tabella 2.1.6a.

Stazione	Num. sezione	Progr. [km]	Superficie [kmq]	Q ₁₀₀ [mc/s]	Q ₂₀₀ [mc/s]	Q ₅₀₀ [mc/s]
Adda a Le Prese	403	20610	577	640	720	820
Adda a Tirano	330	46487	906	750	830	950
Adda a Sondrio	270	73778	1932	1290	1430	1600
Adda a Masino	238	91815	2344	1380	1530	1710
Adda a Fuentes	201	113402	2598	1410	1560	1750

Tabella 2.1.6.a: Portate di piena per l'Adda [m³/s] (Fonte: Autorità di Bacino del fiume Po, Direttiva n.2, Tabella 5)

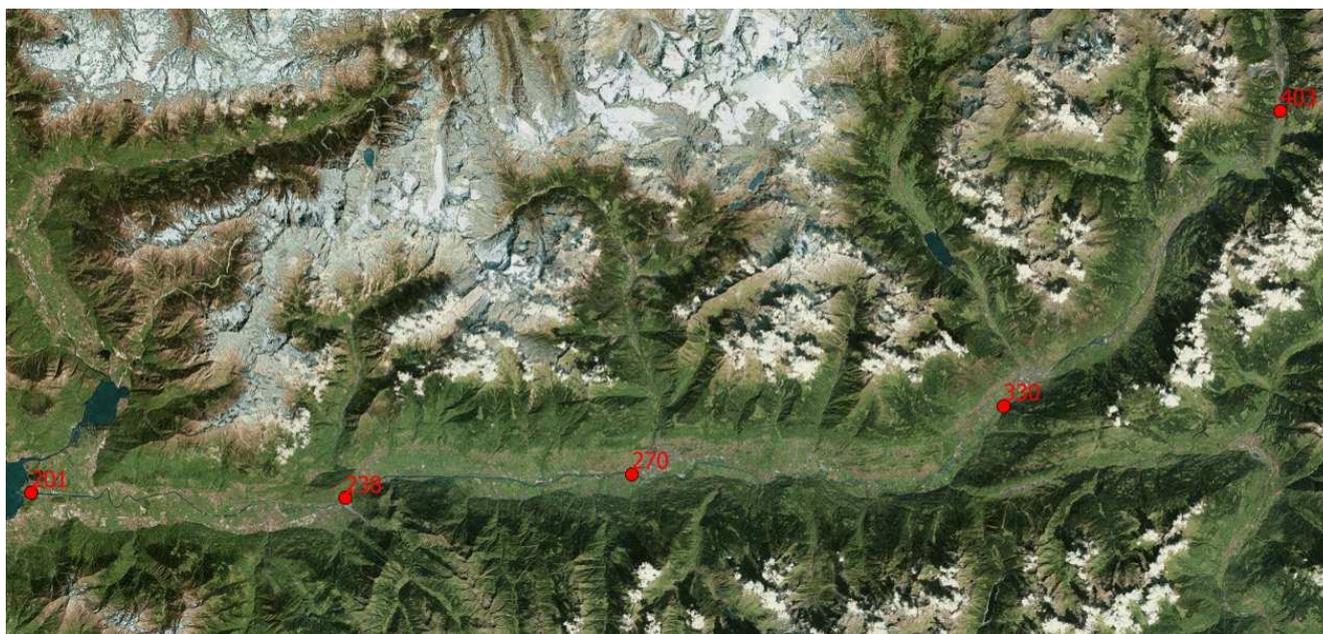


Figura 2.6.1.1: Posizione delle sezioni rappresentative del PAI (vedasi tabella precedente)

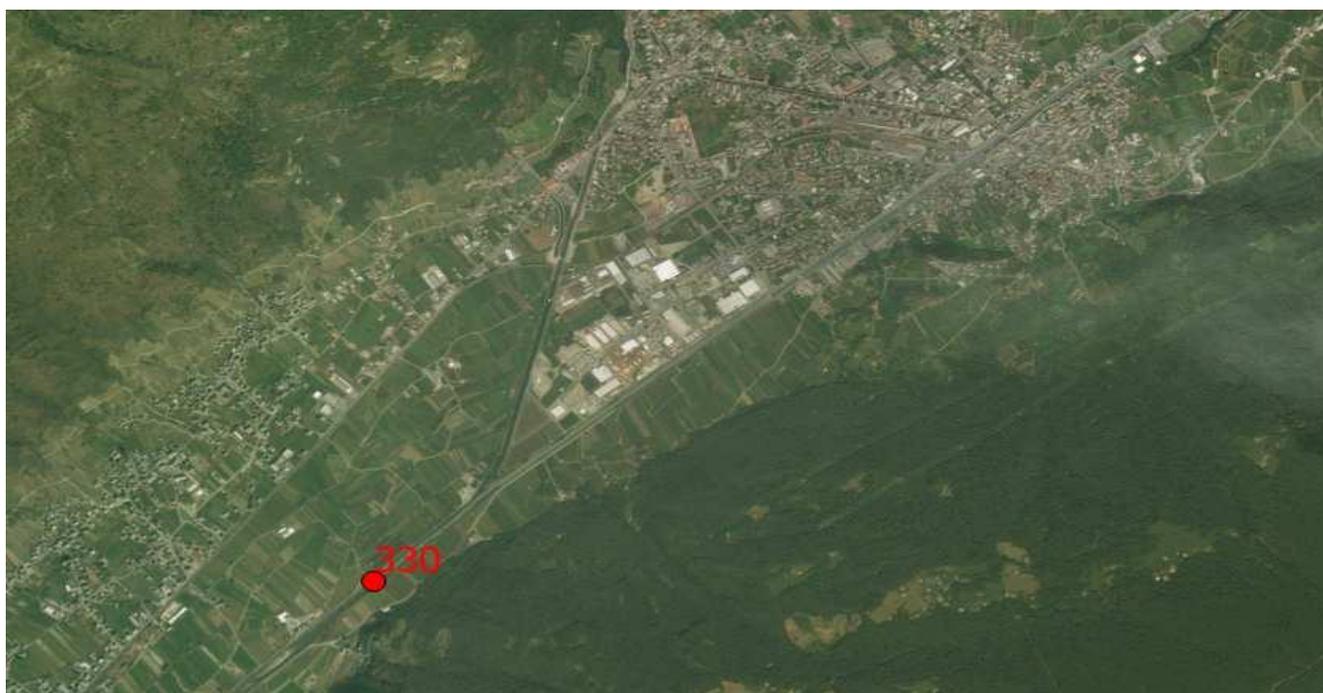


Figura 2.1.6.2: Dettaglio posizione sezione 330 (Adda a Tirano) del PAI (vedasi tabella precedente)

Tali valori sono stati ricavati utilizzando le serie storiche delle portate al colmo riportate negli Annali Idrologici del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (Parte II, Sezione C); in particolare, per quanto riguarda l'Adda, le stazioni idrometriche utilizzate sono: Tirano (13 osservazioni), Fuentes (20 osservazioni), Lavello (35 osservazioni), Pizzighettone (20 osservazioni).

3.1.7 STUDIO DELLA PRO.I.TER S.R.L. ET AL. PER REGIONE LOMBARDIA E A.N.A.S. PER LA PROGETTAZIONE DELLA VARIANTE DI TIRANO DELLA SS 38 (2003)

Lo studio idrologico e idraulico di Pro.i.ter. s.r.l. et al. ha avuto come scopo la verifica delle opere stradali costituenti il nuovo tracciato della SS38 dello Stelvio della variante di Tirano: da esso si evince la grande varietà dei risultati delle elaborazioni statistiche succedutesi; lo studio ha riguardato anche il torrente Poschiavino, in dipendenza dell'interessamento del corso d'acqua da parte del nuovo tracciato stradale.

Per il fiume Adda sono state assunte le portate di piena definite dal P.A.I.; vista l'importanza dell'opera, per la verifica di compatibilità idraulica dell'intera tratta è stato ricercato il valore della portata di piena corrispondente ad un tempo di ritorno pari a 200 anni alla sezione di chiusura del tratto in studio: considerando che il tronco in esame si sviluppa tra il Comune di Tirano e lo svincolo di Stazzona (comune di Villa di Tirano), tra le sezioni dell'Adda di Tirano ($Q_{200} \text{ PAI}=830\text{m}^3/\text{s}$) e Sondrio ($Q_{200} \text{ PAI}=1430\text{m}^3/\text{s}$), è stata effettuata una regionalizzazione nella maniera seguente:

- sono state considerate le seguenti sezioni dell'Adda: Le Prese, Tirano, Sondrio, Masino e Fuentes;
- è stato individuato, per ogni stazione, il punto di coordinate (Superficie; Portata di riferimento);
- sono stati interpolati i punti così localizzati con legge esponenziale: la legge così determinata è la seguente: $Q_{200} = 19,86 \times S^{0,56}$;
- è stata utilizzata la precedente relazione per ogni altra sezione, considerando la superficie del bacino idrografico chiuso a tale sezione. Nella figura seguente vengono rappresentati sia i dati che la funzione interpolare:

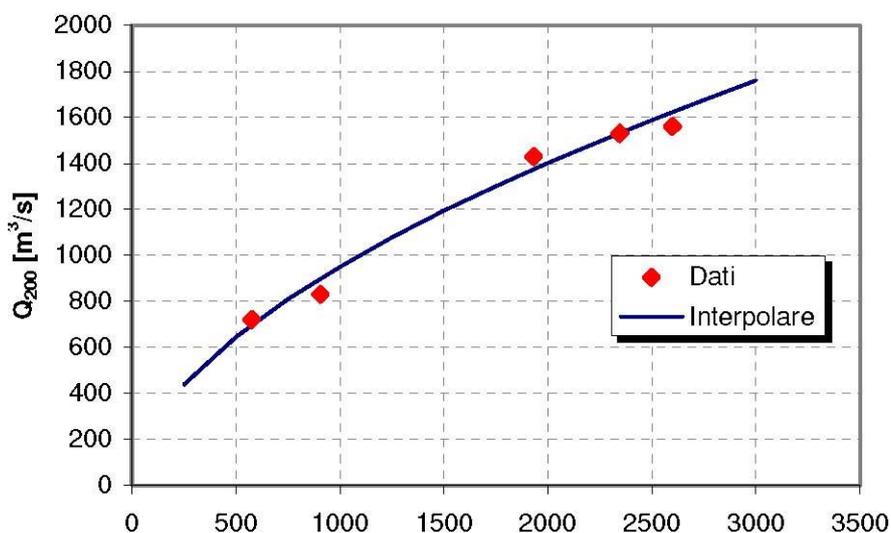


Figura 2.1.7.1: Dati e funzione interpolatrice utilizzata nell'analisi

In particolare, per quanto riguarda il tratto in studio con sezione di chiusura presso il comune di Bianzone, a valle dello svincolo di Stazzona, il bacino idrografico sotteso è pari a circa 1200 km²: la portata al colmo risulta, quindi, di circa 1055 m³/s.

Stazione	Q ₂₀₀ [m ³ /s]
Adda a Le Prese	720
Adda a Tirano	830
Adda a valle della confluenza con il Poschiavino	1055
Adda a Sondrio	1430
Adda a Masino	1530
Adda a Fuentes	1560

Tabella 2.1.7.a: Portate di piena valutate nello Studio Pro.i.ter. s.r.l. et al. [m³/s].

Per il torrente Poschiavino la valutazione delle piene con tempo di ritorno di 200 anni è stata effettuata a partire da un modello di trasformazione afflussi-deflussi basato sulla pluviometria delle stazioni presenti nell'area in indagine o limitrofe ad essa, in modo da costruire le curve di possibilità climatica, espresse secondo la classica relazione monomia:

$$h(\theta, T) = a(T)\theta^n$$

L'analisi della distribuzione spaziale delle precipitazioni di breve durata e forte intensità è stata condotta a mezzo dell'individuazione delle linee iso-a e iso-n (corrispondenti ad un tempo di ritorno di 200 anni), dove *a* ed *n* sono i parametri delle curve di possibilità climatica.

Attraverso l'uso dello ietogramma Chicago è stata effettuata la valutazione della piena con tempo di ritorno duecentennale con l'assunzione che essa sia prodotta da una precipitazione avente il medesimo tempo di ritorno.

Dalla convoluzione fra l'idrogramma unitario IUH di risposta del bacino e lo ietogramma netto delle piogge di progetto sono stati determinati i valori di portata ricercati. Nel caso in esame è stato scelto l'IUH derivato da un sistema di tre serbatoi lineari posti in serie (modello tipo Nash) di costante temporale *k* pari a 0,25T_c, dove T_c è il tempo di corrivazione; tale modello afflussi-deflussi fa riferimento al modello riportato nello studio, datato marzo 1989, svolto dall'Istituto di Idraulica del Politecnico di Milano su commissione del Consiglio Regionale della Lombardia a riguardo degli aspetti idraulici ed idrologici dell'evento alluvionale del luglio 1987. Tale studio è stato calibrato su osservazioni effettuate in corrispondenza di invasi artificiali.

Il modello in esame simula le perdite attraverso una depurazione delle piogge del tipo Curve Number (SCS), applicato a ietogrammi tipo Chicago; i parametri CN e la del modello di depurazione sono stati assunti pari a 70 e 10 mm rispettivamente.

Un esempio dei dati usati per la taratura del modello è l'evento del 18 luglio 1987 sul bacino del T. Caronno chiuso dalla diga di Scais; tale torrente non è direttamente interessato dal tracciato della SS38 ma si trova nella medesima area di bacini oggetto di studio. A fronte di un valore di precipitazione oraria di circa 100 mm/h si è rilevata una portata massima al colmo simulata pari a 144 m³/s, a fronte di una portata al colmo misurata pari a 125 m³/s, con contributo specifico di piena nel bacino pari a 7 m³/s km².

Per il torrente Poschiavino è stata condotta una doppia analisi dividendo il corso d'acqua in due tronchi: uno a monte del lago di Poschiavo e uno a valle. La portata a monte del lago è stata reperita presso il Servizio Idrografico Svizzero ed è pari, per il tempo di ritorno di 200 anni, a 148 m³/s: tale valore è stato utilizzato per la taratura del modello che fornisce un valore di CN pari a 65. Per la determinazione della portata nel tronco a valle del lago è stato applicato il modello afflussi-

deflussi precedentemente descritto. A favore di sicurezza la laminazione del lago è stata considerata nulla. Si è ottenuto un valore di portata al colmo di $166 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.1.8 STUDIO AIPo-AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO (2008)

Lo studio dell'AIPo esamina criticamente la variabilità dei risultati degli studi idrologici descritti in precedenza, evidenziando che la forte variabilità dei risultati può essere giustificata dalla bassa numerosità dei campioni statistici, soprattutto nella sezione di interesse (Tirano); inoltre, il cambiamento della situazione idrologica dovuta alla frana della Val di Pola nel 1987 induce dei dubbi sulla validità della considerazione delle serie storiche rispetto alla modificata situazione attuale. Soprattutto, l'estrapolazione di valori a tempo di ritorno elevato da una serie storica appena sufficiente può condurre a valori troppo sovrastimati.

Lo studio AIPo evidenzia, inoltre, che il valore della portata duecentennale dell'Adda a Tirano secondo il P.A.I. ($830 \text{ m}^3/\text{s}$) è riferito alla sezione 330, situata a valle della confluenza con il Poschiavino (vedasi precedente Figura 2.1.6.2), e che quindi tale valore è da considerarsi come piena dei due corsi d'acqua e non del solo Adda a Tirano.

Sezione	Progr. [km]	Quota idrometrica [m s.l.m.]	Q200 [mc/s]
331	46000	413,34	-
330	46487	409,93	830
329	46992	404,84	-

Tabella 2.1.8.a: Profilo di piena per l'Adda (Fonte: Autorità di Bacino del fiume Po, Direttiva n.2, Tabella 38)

Lo studio procede poi all'analisi statistica delle serie storiche reperite per l'Adda nella stazione di Tirano (misure del S.I.I. e dell'A.E.M. a Sernio) e per il Poschiavino nella stazione di Le Prese (misure del Servizio Idrografico Svizzero), con il foglio di calcolo ELASTA, che ipotizza valide le distribuzioni EVI (di Gumbel) e LN2 (Log-normale a 2 parametri), pesate con diversi metodi.

Dall'esame dei risultati si desume che i valori AIPo per il fiume Adda a Tirano sono decisamente inferiori rispetto a quelli dello studio Pro.I.Ter. e del P.A.I.; analogamente, i valori AIPo ottenuti per il Poschiavino sono inferiori rispetto a quelli dello studio Pro.I.Ter., anche se con differenze molto più contenute ($135 \text{ m}^3/\text{s}$ contro i $166 \text{ m}^3/\text{s}$ dello studio Pro.I.Ter.).

L'AIPo, quindi, sulla base di tutte le considerazioni qui riassunte, assegna alle portate di tempo di ritorno duecentennale i seguenti valori:

Stazione	Q 200 [m3/s]
Adda a Tirano	750 m3/s
Poschiavino a foce in Adda	170 m3/s
Adda a valle Poschiavino	920 m3/s

Tabella 2.1.8.b: Portate di piena valutate nello Studio AIPo per il fiume Po [m^3/s]

Tali valori, adottati da AIPo nelle successive analisi idrauliche, si basano sull'assunzione dell'ipotesi che, una volta pervenuta all'ingresso dell'abitato di Tirano, l'onda di piena si trasferisca a valle senza subire modifiche e che subito a valle del Poschiavino essa subisca una mera traslazione per arrivare, al colmo, alla portata massima di progetto di $920 \text{ m}^3/\text{s}$. Lo studio specifica che, sebbene ciò possa sembrare un'approssimazione piuttosto rozza del fenomeno, essa rappresenta un'ipotesi accettabile per il fatto che il tratto cittadino dell'Adda in Tirano è praticamente rettilineo e privo di un significativo potere di laminazione, a meno di considerare esondazioni.

3.2 ULTERIORI STUDI ANALIZZATI NEL PRESENTE PROGETTO

Nel presente aggiornamento dell'analisi idrologica sono stati inoltre considerati i seguenti studi:

- Progetto FLORA – Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale;
- Studio degli Ingg. Baggini Amos e Begnis Raffaella, commissionato dalla Provincia di Sondrio (2012);
- Progetto di Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (2014).

3.2.1 PROGETTO FLORA – AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE AMBIENTALE

Nel 2012 ARPA Piemonte, in partenariato con ARPA Lombardia e con il Canton Ticino, ha proposto uno specifico progetto sulle tematiche del rischio idraulico denominato FLORA (*Flood Estimation in complex orographic area for Risk mitigation in Alpine space -La difesa dalle alluvioni nel territorio alpino*); tale studio ha avuto come obiettivi il miglioramento di strumenti operativi per la difesa dalle alluvioni in un'area ad orografia complessa come quella rappresentata dalle valli alpine italo-svizzere e l'aumento del livello di protezione dalle alluvioni quale strumento di adattamento e mitigazione degli effetti indotti sul territorio dai cambiamenti climatici.

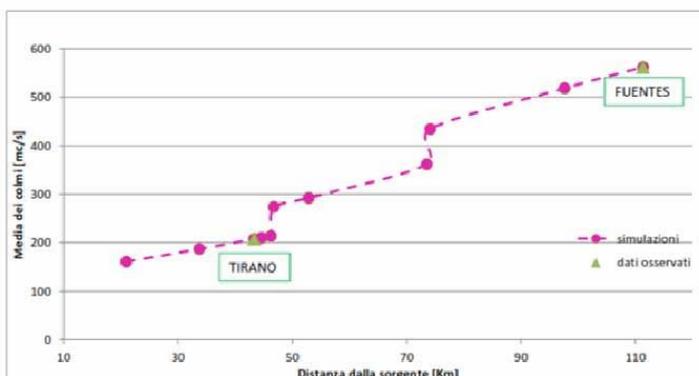
In particolare, le tematiche affrontate nel progetto FLORA hanno riguardato anche l'aggiornamento delle valutazioni probabilistiche delle portate di piena a scala regionale quale indispensabile strumento a base della valutazione del rischio di inondazione e, più in generale, per un appropriato dimensionamento delle opere idrauliche connesse al corso d'acqua.

Nel tratto di interesse del fiume Adda, il progetto FLORA fornisce i seguenti risultati:



STIMA DELLE PORTATE AL COLMO DI PIENA

ADDA PRE LACUALE



Sezione	Distanza dalla sorgente [Km]	Media massimi annuali di portata al colmo [mc/s]	Qc	Qc	Qc	Qc	Qc	Qc	Qc	Qc
			Tr 1.33 anni	Tr 5 anni	Tr 10 anni	Tr 20 anni	Tr 50 anni	Tr 100 anni	Tr 200 anni	Tr 500 anni
le prese sondalo	20.970	161	104	214	264	314	383	439	497	578
post roasco	23.729	187	121	240	307	365	446	510	577	672
tirano	43.326	208	134	277	341	405	495	566	641	745
pre poschiavo	44.628	210	136	280	345	411	501	573	649	755
pre poschiavo bis	46.244	213	138	285	350	417	509	582	659	767
post poschiavo	46.740	224	177	365	449	535	652	746	844	983
teglino	52.832	292	189	390	480	571	697	797	902	1050
pre mallero	73.499	362	234	482	594	707	862	986	1117	1299
post mallero	74.133	435	282	579	713	849	1036	1185	1341	1561
morbegno	97.621	519	336	691	851	1013	1236	1414	1601	1863
FUENTES	111.329	562	364	749	922	1098	1340	1533	1735	2019

Sezioni in grassetto: dati osservati (se in maiuscolo: sezioni storiche progetto FLORA) – Per le altre sezioni: dati simulati

Figura 2.2.1.1: Risultati progetto FLORA per il tratto in esame (Fonte: portale Idrologico Geografico di ARPA Lombardia)

3.2.2 STUDIO DEGLI ING. BAGGINI AMOS E BEGNIS RAFFAELLA, COMMISSIONATO DALLA PROVINCIA DI SONDRIO (2012)

Nell'ambito della redazione delle mappe di pericolosità e del rischio di alluvioni del territorio di fondovalle nella tratta compresa tra lo sbocco nel lago di Como e la città di Tirano, nel 2012 la Provincia di Sondrio ha conferito ai professionisti Ing. Baggini Amos e Ing. Begnis Raffaella l'incarico per la modellazione idraulica delle piene del fiume Adda (nella tratta suddetta) a supporto del progetto di Variante del PAI in attuazione alla Direttiva 2007/60/CE.

Lo studio ha predisposto un modello idrologico semplificato finalizzato a definire le portate al colmo per diversi tempi di ritorno, facendo riferimento ai dati del PAI per l'Adda sopralacuale e tentando di superare la problematica della variazione delle portate al colmo per progressive intermedie a quelle del P.A.I. stesso.

A tal fine, dato che le portate a disposizione si riferiscono ad un numero limitato di sezioni rappresentative dell'asta fluviale, nello studio sono stati stimati i valori delle portate in corrispondenza degli apporti significativi, tramite una interpolazione tra i valori di valle e quelli di monte proporzionale alle aree di bacino sottese; in tal modo lo studio ha ottenuto una discretizzazione senz'altro più aderente alla realtà tenendo conto dei contributi dei 14 principali affluenti. Non sono stati applicati i metodi di regionalizzazione in quanto i professionisti hanno ritenuto che le portate P.A.I. derivino da una stima probabilistica delle portate di piena con un livello di affidabilità superiore rispetto a quello ottenibile con metodi semplificativi di similitudine idrologica.

RIFERIMENTO	SEZIONE	PROGRESSIVA		SUPERFICIE	Q20	Q100	Q200	Q500
	PAI	PAI (KM)		Km2	m3/sec	m3/sec	m3/sec	m3/sec
Tirano	337	42+680	42,680	906,00	530,00	750,00	830,00	950,00
Monte sbocco Posch	331bis	45+300	45,300		530,00	750,00	830,00	950,00
Sbocco Posch	331	45+380	45,300	1056,00	595,00	828,00	917,00	1045,00
Monte sbocco Belviso	318ter	51+300	51,300		595,00	828,00	917,00	1045,00
Sbocco Belviso	318BIS	51+323	51,323	1128,00	627,00	866,00	959,00	1090,00
Monte sbocco Malgina	307BIS	57+050	57,050		627,00	866,00	959,00	1090,00
Sbocco Malgina	307	57+065	57,065	1214,00	665,00	912,00	1009,00	1144,00
Monte sbocco Fontana	300ter	60+440	60,440		665,00	912,00	1009,00	1144,00
Sbocco Fontana	300BIS	60+493	60,493	1291,00	698,00	952,00	1054,00	1193,00
Monte sbocco Armisa	297BIS	62+000	62,000		698,00	952,00	1054,00	1193,00
Sbocco Armisa	297	62+004	62,004	1340,00	720,00	978,00	1083,00	1224,00
Monte sbocco Venina	279bis	68+950	68,950		720,00	978,00	1083,00	1224,00
Sbocco Venina	279	68+985	68,985	1560,00	815,00	1092,00	1211,00	1363,00

Tabella 2.2.2.a: Estratto (per la zona di Tirano) dei risultati dell'interpolazione sviluppata a partire dalle sezioni rappresentative del PAI

I dati ottenuti sono poi stati confrontati con le stime effettuate in altre sedi: in particolare lo studio "SP1.1 – piene e naturalità degli alvei" allegato al P.A.I. e le portate stimate da ARPA Lombardia nell'ambito del "Progetto Flora" (Progetto Flora: "Flood estimation in complex Orographic area for Risk mitigation in Alpine space", elaborato da A.R.P.A. Lombardia e Piemonte con il contributo del Dipartimento del Territorio della Repubblica del Canton Ticino) con metodologie di tipo semi-deterministico.

Sezione	Q ₂₀₀ [m3/s]		
	"Studio SP1.1"	"Progetto Flora"	"Studio Baggini-Begnis"
Tirano	829,07	641,00	830,00
Monte sbocco Poschiavino	837,89	659,00	830,00
Sbocco Poschiavino	782,30	844,00	917,00

Tabella 2.2.2.b: Confronto dei risultati dello "Studio Baggini-Begnis" con i dati relativi agli altri studi citati

Il confronto ha portato i professionisti citati alle seguenti considerazioni:

- il modello P.A.I. concentra in quattro sezioni bruschi incrementi di portata;

il modello in moto vario "SP1.1" introduce due punti di incremento di portata in più rispetto al P.A.I. e presenta decrementi in corrispondenza delle laminazioni legate tuttavia a una topografia e idrologia non più attuale;

il "Progetto Flora" ha un andamento delle portate che bene interpreta i valori di "SP1.1", tuttavia appare come il modello P.A.I. poco discretizzato lungo l'asta fluviale;

il modello semplificato proposto, "Studio Baggini-Begnisi", introduce le discretizzazioni di portata ritenute necessarie per meglio rappresentare i contributi degli affluenti principali, ha valori di portata sempre superiori al modello "SP1.1-P.A.I." e bene interpreta anche le risultanze del "Progetto Flora";

le portate di partenza della tratta in oggetto, ovvero Tirano, che sottende un bacino di 906 km², sono notevolmente diverse; quelle di P.A.I., per ogni Tr, risultano maggiori dei quelle del "Progetto Flora" mediamente del 30% (per Tr=200 anni si passa da 830 a 641 m³/s). A ciò corrisponde un apporto unitario q rispettivamente di 0,9 m³/s km² ("Studio Baggini-Begnisi") e di 0,7 m³/s km² ("Progetto Flora"): tale ultimo contributo unitario, paragonato a quello di bacini simili per estensione e localizzazione derivanti da letteratura, risulta modesto;

non essendoci elementi oggettivi di taratura su elevati tempi di ritorno per valutare quale modello sia più affidabile, può essere utile adottare cautelativamente le portate più elevate tra il modello "Studio Baggini-Begnisi" (P.A.I. discretizzato) e il "Progetto Flora": così facendo si sovrastimano le portate al colmo rispetto a tutti i modelli considerati.

3.2.3 PROGETTO DI PIANO PER LA VALUTAZIONE E LA GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI (2014)

In ottemperanza dell'art.7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.Lgs. n.49 del 23.02.2010, l'Autorità di Bacino del fiume Po ha predisposto, nel 2014, il Progetto di Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni che si declina, per il bacino dell'Adda sopralacuale, nel documento "IV A. Area a rischio significativo di alluvione -ARS Distrettuali – 2. Schede monografiche: Fiume Adda da Sondalo al lago di Como".

All'interno di tale elaborato, nel capitolo "Descrizione di eventi di piena recenti ed eventuale analisi delle portate di riferimento" viene spiegato che "a seguito di un Accordo di collaborazione tra Autorità di Bacino, Regione Lombardia e Provincia di Sondrio è stata condotta un'analisi idraulica finalizzata alla redazione delle mappe di pericolosità e rischio (cfr. "Studio degli Ingg. Baggini Amos e Begnisi Raffaella, commissionato dalla Provincia di Sondrio" descritto nel precedente paragrafo 3.2.2). (...)

La portata con Tr=200 del PAI è stata aggiornata per le valutazioni dello studio sopracitato utilizzando anche i dati messi a disposizione nell'ambito dello studio Flora (ARPA Lombardia 2013). I valori di tale portata sono a Tirano 830 m³/s, a Sondrio a valle dello sbocco Mallero 1430 m³/s, a Fuentes 1735 m³/s. La scelta di tali valori, non essendoci elementi oggettivi di taratura affidabili, è cautelativa avendo preso a riferimento nei diversi tratti le portate più elevate tra il PAI e il progetto Flora."

3.3 CONCLUSIONI IN MERITO ALL'ANALISI DEGLI STUDI PREGRESSI

Si riassumono nel seguito i valori di portata con tempo di ritorno 200 anni valutati, dai principali studi analizzati, per il fiume Adda a Tirano e a valle dell'immissione del Poschiavino:

Studio	Q ₂₀₀ [m ³ /s]	
	A Tirano	A valle del Poschiavino
ISMES-CAE	451	-
Italtekna	475-625	-
Pro.I.Ter	830	1055
P.A.I.	720*	830*
AIPo	750	920
Baggini-Begnig	830	917

Tabella 2.3.a: Confronto dei risultati dei principali studi pregressi analizzati

In merito ai dati sopra riportati appare opportuno sviluppare le seguenti considerazioni:

1. Come evidenziato anche dallo studio AIPo, il valore che il P.A.I. assegna all'Adda con la dicitura "a Tirano" (830 m³/s) deve essere, per correttezza, attribuito al tratto di corso d'acqua a valle della confluenza del Poschiavino e non in corrispondenza del misuratore di Tirano: infatti, la sezione denominata 330 nella modellazione P.A.I., alla quale viene assegnata la portata di 830 m³/s, è situata a valle dell'immissione, come evidenziato sia dalla cartografia relativa (precedente Figura 2.1.6.2) che dalla tabella della simulazione del profilo di piena con Tr=200 anni (tabella 38 allegata alla Direttiva n.2, vedasi estratto in figura successiva) nella quale la quota idrometrica della modellazione alla sezione 330 risulta essere 409,93 m s.m.m., incompatibile con la quota del misuratore di Tirano pari a 430 m s.m.m.

Tabella 38: profilo di piena per il fiume Adda sopralacuale

Sez.	Progr. (km)	T = 200 anni		Sez.	Progr. (km)	T = 200 anni		Sez.	Progr. (km)	T = 200 anni	
		Quota idrometrica (m s.m.)	Q (m ³ /s)			Quota idrometrica (m s.m.)	Q (m ³ /s)			Quota idrometrica (m s.m.)	Q (m ³ /s)
403	20.610	955.20	720	335	43.398	437.55	267	75.752	280.01		
402	20.990	953.88		334	43.662	434.94	266	76.195	279.10		
401	21.240	951.62		333	44.139	429.32	265	76.458	279.00		
400	21.412	951.20		332	45.116	420.74	264	76.558	278.95		
399	21.430	950.24		331	46.000	413.34	263	77.361	277.29		
398	21.460	950.00		330	46.487	409.93	262	77.843	276.48		
397	21.535	949.42		329	46.992	404.84	261	78.251	275.63		
396	21.555	949.39		328	47.370	402.34	260	78.808	275.15		

Figura 2.3.1: Estratto della tabella 38 allegata alla Direttiva n.2 del P.A.I.

2. Alla luce di quanto illustrato nel precedente punto 1, non si condivide con l'attribuzione da parte del P.A.I. alla sezione 330 di una superficie di bacino pari a 906 km², come indicato nella Tabella 5 allegata alla Direttiva n.2, della quale si riporta un estratto nella successiva Figura 2.3.2: il bacino imbrifero dell'Adda a valle della confluenza del Poschiavino comprende anche la quota relativa a quest'ultimo, per un totale di circa 1051 km². Il valore di 906 km² corrisponde alla superficie di bacino chiusa al misuratore di Tirano, come si evince dalle caratteristiche riportate nell'Allegato 4 alla Direttiva n.2, relativo alle "Stazioni di misura dei dati di portata massima al colmo e Serie storiche di portata massima al colmo utilizzate" (vedasi estratto in successiva Figura 2.3.3).

Tabella 5: portate di piena per i corsi d'acqua principali del bacino dell'Adda (Adda, Brembo, Mera, Serio)

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q20 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro Denominazione
		Progr.(km)	Cod.	Denomin.						
Adda	Brembo	18.954	135	Lenna	155	450	560	650	730	
Adda	Brembo	20.460	121	Scalvino	315	620	780	840	920	
Adda	Brembo	51.683	32	Ponte Briolo	765	830	1040	1130	1250	Brembo a Ponte Briolo
Adda	Brembo	65.474	5	Confluenza in Adda	964	900	1130	1220	1350	
Adda	Serio	54.660	110	Alzano Lombardo	551	410	530	570	630	
Adda	Serio	81.600	66	Romano di Lombardia	717	470	570	620	700	
Adda	Serio	105.524	24	Crema	1034	530	650	720	800	
Adda	Serio	116.572	5	Confl. in Adda	1078	530	650	720	800	
Adda	Adda	20.610	403	Le Prese	577	460	640	720	820	
Adda	Adda sopralac.	46.487	330	Tirano	906	530	750	830	950	Adda a Tirano
Adda	Adda sopralac.	73.778	270	Sondrio	1932	980	1290	1430	1600	

Figura 2.3.2: Estratto della tabella 38 allegata alla Direttiva n.2 del P.A.I.

40078 Adda a Tirano

Distanza dalla confluenza km	Numero osservazioni	Superficie bacino km ²	Hmin m s.m.	Hmed m s.m.	Hmax m s.m.
65.0	13	906	430.78	2136.0	4050.0
			Portata massima al colmo		
			Anno di misura		
			1925	95.5	
			1926	540.0	
			1927	190.0	
			1928	217.0	
			1929	92.0	
			1930	123.0	
			1931	139.0	
			1932	133.0	
			1933	174.0	
			1934	113.0	
			1935	291.0	
			1936	186.0	
			1937	404.0	

Figura 2.3.3: Estratto dell'Allegato 4 alla Direttiva n. 2 del P.A.I.

3. Nello "Studio Baggini-Begnisi", che si basa sui risultati del P.A.I., il valore di 830 m³/s viene assegnato, ai fini dell'interpolazione dei valori di portata in nuove sezioni del corso d'acqua, all'Adda a Tirano, a monte della confluenza del Poschiavino.

4. In generale si nota una notevole variabilità nei risultati degli studi idrologici presi in esame; come espresso anche da AIPo, tale forte variabilità può essere giustificata dalla bassa numerosità dei campioni statistici, soprattutto nella sezione di interesse (Tirano).

3.4 ANALISI IDROLOGICA

Nel presente capitolo si espone la procedura utilizzata per l'analisi idrologica, necessaria per adeguare lo studio ai più aggiornati dati idrologici e metodi di calcolo disponibili al momento presente. Tale analisi fornisce valori più attendibili per il dimensionamento delle opere e per le verifiche di compatibilità idraulica.

Tale analisi è stata sviluppata utilizzando tre metodologie distinte: la regionalizzazione delle portate (Rapporto Nazionale VA.PI. 2001), l'analisi statistica dei dati di portata e la modellazione afflussi-deflussi.

3.4.1 REGIONALIZZAZIONE DELLE PORTATE (VA.PI.)

Per la stima delle portate al colmo della piena si è utilizzato il metodo di regionalizzazione presente nel progetto VA.PI. (De Michele e Rosso, 2001), facendo riferimento al documento "Valutazione delle piene, Italia nord occidentale" estratto dal rapporto nazionale VA.PI. del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-GNDCI) a cura di Carlo de Michele e Renzo Rosso.

Indicando con Q_p il massimo annuale della portata di piena al colmo corrispondente ad un prefissato periodo di ritorno, si pone:

$$Q_p = K_T \cdot m(Q) \quad (1)$$

dove K_T è il fattore probabilistico di crescita regionale, assunto omogeneo per la zona in esame, mentre $m(Q)$, o portata indice, è la media dei massimi annuali della portata stimata in corrispondenza della sezione di interesse.

Il fattore probabilistico di crescita regionale viene descritto dalla seguente relazione, che è legata ai valori assunti dai parametri della distribuzione di probabilità GEV:

$$w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]^k \right\}$$

In sostanza si ha che il coefficiente di crescita previsto dal progetto VA.PI. viene valutato attraverso i coefficienti $\varepsilon = 0,745$, $\alpha = 0,365$ e $\kappa = -0,11$ e assume i seguenti valori:

	Tr [anni]					
	10	20	30	50	100	200
Coefficiente di crescita K_T	1,68	2,03	2,24	2,52	2,93	3,37

Il terzo livello di regionalizzazione del progetto VA.PI. propone delle relazioni (metodi indiretti) per la stima della portata indice $m(Q)$ nei sottobacini dell'Italia Nord Occidentale; in particolare, per il bacino in esame si utilizzeranno i valori riferiti alla zona A la quale abbraccia i bacini padani dal Chiese al Sesia.

Per la stima di $m(Q)$ tra le varie formulazioni proposte si utilizza la seguente, avendo a disposizione tutti i parametri necessari:

$$m(Q) = 9,3 \cdot 10 A^{1,124} a_1^{2,630} n^{3,162} \quad (2)$$

dove A rappresenta la superficie del bacino in km^2 , a_1 è il coefficiente pluviale orario e n è l'esponente di invarianza di scala pluviale, mediati sul bacino, rispettivamente pari a 21,41 e 0,367 (valori estratti dal Portale Idrologico -Geografico della Regione Lombardia – ARPA Lombardia).

La superficie del bacino chiuso a Tirano è di 898 km², pertanto la portata indice secondo la (2) risulta $m(Q) = 258 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre quello chiuso a Valle del Poschiavino è pari a 1137 km² e la portata indice secondo la (2) risulta $m(Q) = 335 \text{ m}^3/\text{s}$.

La portata al colmo della piena per i tempi di ritorno di 10, 20, 30, 50, 100, 200 anni si ottiene dunque moltiplicando la portata indice per il corrispondente fattore probabilistico di crescita valutato secondo la distribuzione di probabilità GEV. Le portate al colmo per il bacino sotteso alla stazione idrometrica di Tirano valutate per i tempi di ritorno precedentemente citati sono riportate in *Tabella 2.4.1.b*. Nella medesima tabella sono riportate anche le portate al colmo per il bacino sotteso valutate a partire da un valore di $m(Q)$ stimato utilizzando la serie dei dati di portata registrati nella sezione di interesse, come indicato da VA.PI. nel metodo diretto, applicabile anche nel caso in cui i dati di portata a disposizione non siano molti, ma comunque più di 7-10 (Studio idrologico relativo al progetto della diga di Valda", Fiorentino (2002)).

ANNO	Qc [m ³ /s]	DATI	ANNO	Qc [m ³ /s]	DATI	ANNO	Qc [m ³ /s]	DATI
1925	95,5	S.I.I.	1937	404	S.I.I.	1969	140	A.E.M.
1926	540	S.I.I.	1958	260	A.E.M.	1970	170	A.E.M.
1927	190	S.I.I.	1959	85	A.E.M.	1971	160	A.E.M.
1928	217	S.I.I.	1960	600	A.E.M.	1972	170	A.E.M.
1929	92	S.I.I.	1961	230	A.E.M.	1973	215	A.E.M.
1930	123	S.I.I.	1962	150	A.E.M.	1974	120	A.E.M.
1931	139	S.I.I.	1963	160	A.E.M.	1975	200	A.E.M.
1932	133	S.I.I.	1964	145	A.E.M.	1976	280	A.E.M.
1933	174	S.I.I.	1965	200	A.E.M.	1977	210	A.E.M.
1934	113	S.I.I.	1966	100	A.E.M.	1978	170	A.E.M.
1935	291	S.I.I.	1967	130	A.E.M.	1980	305	A.E.M.
1936	186	S.I.I.	1968	340	A.E.M.	1981	275	A.E.M.

Tabella 2.4.1.a: Serie storica di valori di portata registrati alla stazione idrometrica di Tirano (Fonte: pubblicazioni del S.I.I. "dati caratteristici dei corsi d'acqua italiani" integrate con dati rilevati a cura dell'A.E.M. di Milano negli anni 1958-1981)

In base ai dati registrati (vedasi Tabella 2.4.1.a) si valuta in 212 m³/s il valore di $m(Q)$ (media aritmetica dei valori registrati), il quale moltiplicato per i valori dei coefficienti di crescita del progetto VA.PI., conduce ai valori delle portate al colmo della quarta colonna di Tabella 2.4.1.b.

Tr [anni]	Q _p [m ³ /s] bacino chiuso a Tirano	
	m(Q) da equazione (2)	m(Q) da dati registrati
10	407	335
20	488	401
30	537	442
50	602	495
100	694	571
200	794	653

Tabella 2.4.1.b: Portate al colmo secondo il progetto VA.PI. con portata indice per il bacino chiuso a Tirano, valutata tramite l'equazione (2) e tramite media delle portate misurate.

Tr [anni]	Q_p [m ³ /s] bacino chiuso a Stazzona (valle Poschiavino)
	$m(Q)$ da equazione (2)
10	529
20	634
30	698
50	782
100	903
200	1032

Tabella 2.4.1.c Portate al colmo secondo il progetto VA.PI. con portata indice per il bacino chiuso a Stazzona (a valle della confluenza con il Poschiavino) valutata tramite l'equazione (2).

Si ricorda che per il bacino a valle della confluenza con il Poschiavino la stima di $m(Q)$ e quindi della Q_p tramite i dati di portata misurata non è utilizzabile in quanto non esistono dati di portata misurata a valle della confluenza.

3.4.2 ELABORAZIONE STATISTICA DEI DATI DI PORTATA MISURATA

La portata massima annuale rappresenta il massimo valore di portata al colmo verificatosi nell'arco dell'anno. Al fine di definire i valori di portata per l'assegnato tempo di ritorno si è proceduto alla stima dei parametri delle funzioni di probabilità da adattare alle osservazioni; nell'analisi statistica sono state prese in considerazione le distribuzioni di Gumbel, Gamma a 2 e 3 parametri, Log normale a 2 e 3 parametri, Esponenziale e GEV stimando i parametri con il metodo dei momenti, dei momenti modificato, dei minimi quadrati e della massima verosimiglianza. La scelta delle leggi di probabilità che meglio si adattano al campione a disposizione è stata effettuata attraverso il test di Pearson (Maione U. e Moisello U., 1993, Elementi di statistica per l'idrologia, La goliardica Pavese).

Le elaborazioni riguardano le portate misurate a Tirano (Fonte: pubblicazioni del S.I.I. "Dati caratteristici dei corsi d'acqua italiani" integrate con dati rilevati a cura dell'A.E.M. di Milano negli anni 1958-1981).

Sono state quindi individuate le distribuzioni di probabilità che meglio si adattano ai dati storici di portata massima annuale al colmo (Figura 2.4.2.1): distribuzione di Log normale a 3 parametri (metodo di stima dei minimi quadrati), distribuzione Esponenziale (metodo di stima dei minimi quadrati), distribuzione GEV (metodo di stima dei momenti modificato). Le portate al colmo ad assegnato tempo di ritorno sono riportate nella Tabella 2.4.2.a.

Per ogni tempo di ritorno, la portata di riferimento è stata ottenuta dalla media aritmetica dei valori ottenuti dalle migliori 3 distribuzioni.

TR [anni]	2	10	50	100	200
Q_p [m ³ /s] (log normale a 3 parametri – min quad)	178	368	604	723	856
Q_p [m ³ /s] (Esponenziale – min quad)	174	392	610	704	789
Q_p [m ³ /s] (GEV – momenti mod)	182	344	529	623	726
MEDIA	178	368	581	683	793

Tabella 2.4.2.a: Portate al colmo della piena stimate presso Tirano utilizzando tre diverse distribuzioni di probabilità

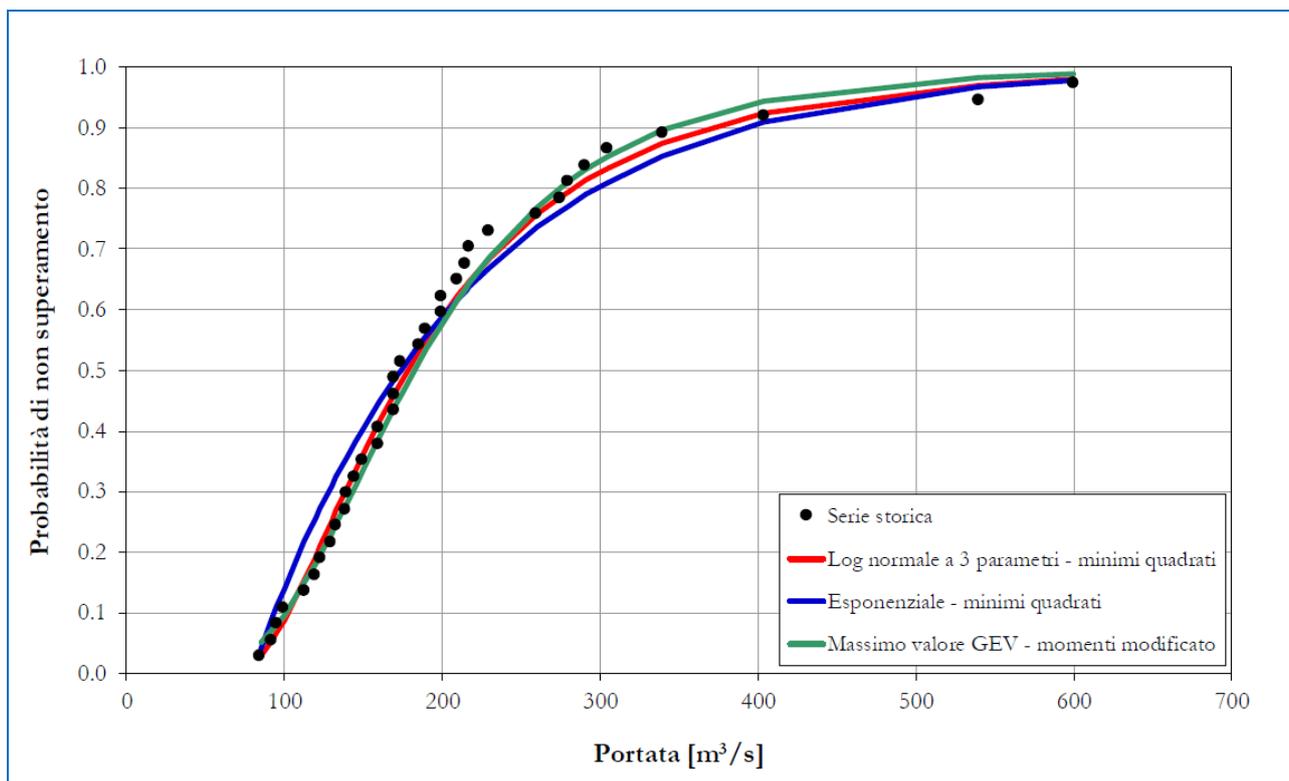


Figura 2.4.2.1: Curve di probabilità delle massime portate annuali al colmo presso la stazione di Tirano

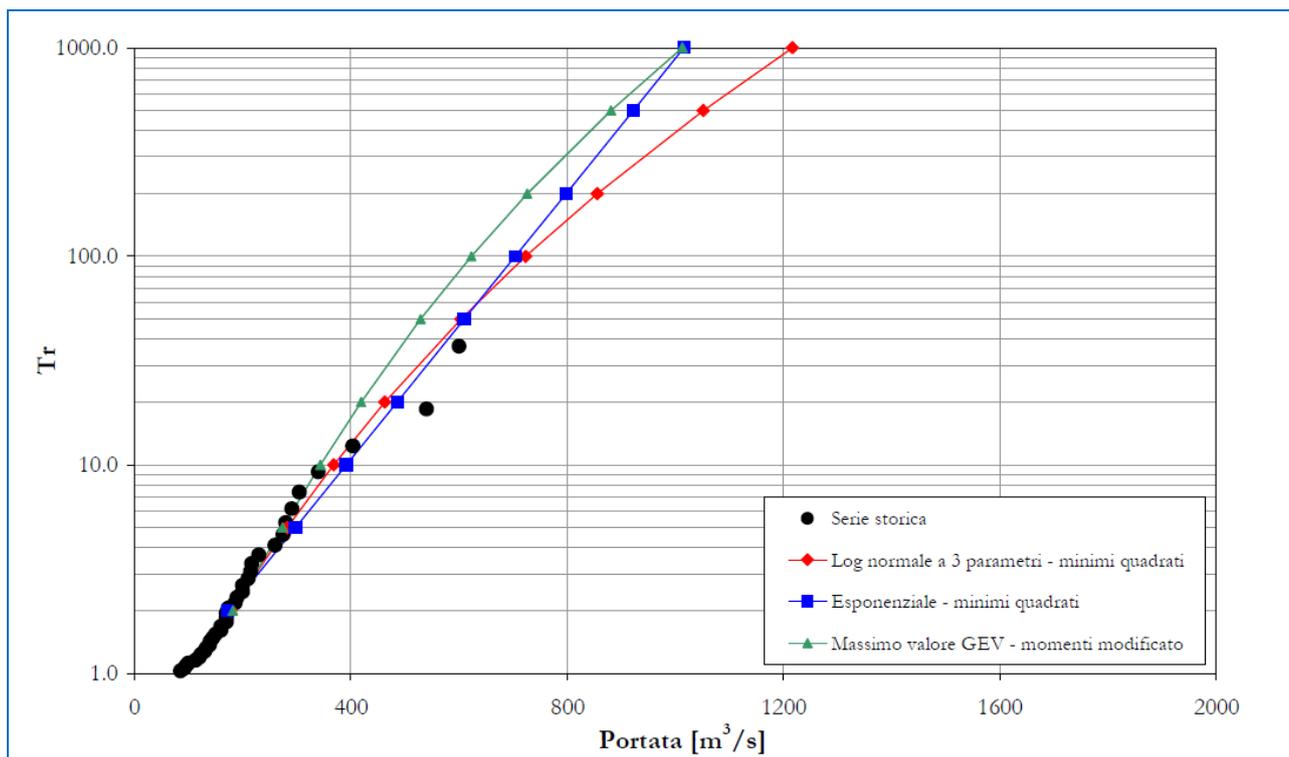


Figura 2.4.2.2: Curve di probabilità delle massime portate annuali al colmo presso la stazione di Tirano

3.4.3 ANALISI CON METODO AFFLUSSI-DEFLUSSI

Caratteristiche del bacino imbrifero

Il fiume Adda ha origine dai laghetti di Alpisella, nell'alta Val di Fraele, sulle Alpi Retiche, a quota 2.235 m s.l.m.m., all'interno del territorio della Provincia di Sondrio. Dopo un percorso di circa 125 km termina il suo corso prelacuale nel Lario, a quota 199 m, superando un dislivello di 2.038 m, con una pendenza media dell'1,63 %. Il bacino del fiume Adda è alimentato da ghiacciai e laghi, alcuni artificiali; i versanti sono diretti, ricchi di boschi e pascoli soprattutto nel tronco medio. In alcuni punti si ritrovano ammassi morenici. La morfologia attuale della Valtellina è il risultato delle profonde trasformazioni legate all'erosione e deposizione di materiale da parte del ghiacciaio dell'Adda in direzione est – ovest, durante il Quaternario, e alle azioni dovute al reticolo idrografico impostatosi successivamente. Le lingue del ghiacciaio hanno elaborato l'incisione valliva conferendole il classico profilo ad "U", caratteristico di una valle glaciale. La piana è un'antica conca glaciale, colmata poi da depositi alluvionali, in cui si verifica perciò una brusca variazione di pendenza tra i versanti montuosi ai lati e il fondovalle. Questa differenza è stata in parte attenuata dai coni di deiezione in cui divagano tutti gli affluenti dell'Adda. La struttura geologica prevalente è costituita da micascisti e talcoscisti; non mancano dolomie, graniti e gneiss nella parte alta del bacino. In parecchie valli laterali si riscontrano morene glaciali e grandi depositi alluvionali e detritici. La granulometria del materiale che costituisce l'alveo rispecchia la progressiva diminuzione di energia della corrente nel suo procedere da monte verso valle. Nella parte alta, infatti, si riscontra la prevalente presenza di materiale a granulometria grossolana (ghiaia e blocchi), con dimensioni che decrescono parallelamente alla diminuzione di velocità della corrente, fino a giungere ai depositi più fini nell'ultimo tratto, prima dello sbocco nel lago. Nel complesso si tratta di un'area caratterizzata da una situazione morfologica in continua evoluzione a causa della diffusione ed instabilità dei depositi morenici.

Lo sviluppo della rete idrografica valtellinese diviene man mano più complesso verso la foce, il che rende, in qualche misura, ragione della circostanza che il contributo unitario di portata al colmo non diminuisce sensibilmente verso valle. Un'altra spiegazione di tale evidenza può essere ricercata nel fatto che il basso bacino dell'Adda mostra una pluviometria più elevata, sia in termini medi annui che in termini di eventi intensi e di breve durata. Per quanto concerne la media annua la Valtellina, infatti, è caratterizzata da un regime meteorico con precipitazioni via via più scarse man mano che da Colico si risale la valle. Il minimo assoluto si colloca attorno a Tirano con circa 730 mm/anno. Ulteriore disuniformità nel regime delle piogge si riscontra anche a livello di versante, risultando quello orobico maggiormente piovoso di quello retico, in dipendenza della disposizione dei rilievi rispetto al bacino del Mediterraneo, da cui pervengono le perturbazioni temporalesche. Infine, occorre senz'altro fare menzione del vasto sfruttamento a fini idroelettrici che è stato fatto del territorio valtellinese, compiuto attraverso la realizzazione di serbatoi artificiali o mediante l'ampliamento e la regolazione di quelli naturali esistenti.

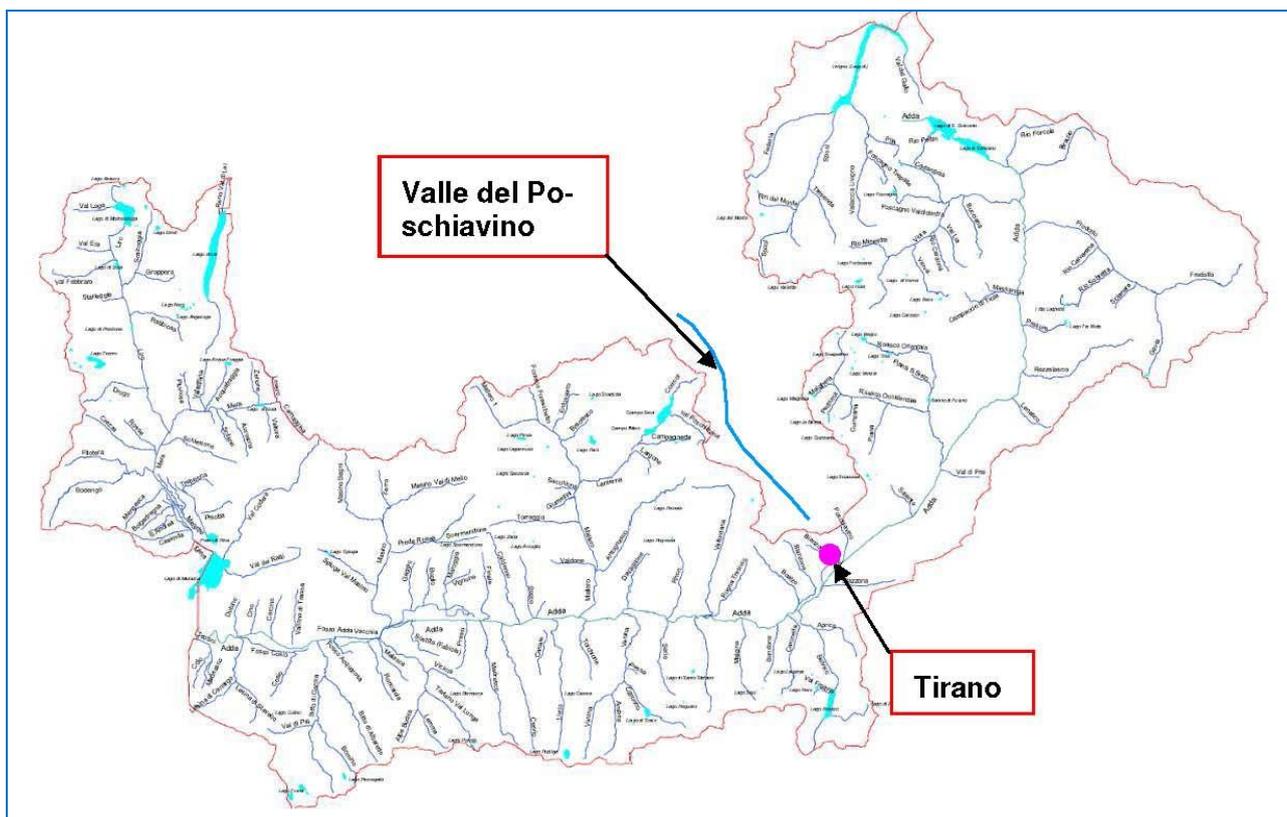


Figura 2.4.3.1: Bacino idrografico del fiume Adda sopra-lacuale con indicazione della posizione di Tirano. (in questa immagine è assente la valle del Poschiavino in territorio svizzero).

Per lo studio delle caratteristiche morfologiche ed altitudinali del bacino si è deciso di utilizzare il Modello Digitale del Terreno con risoluzione iniziale di 5 m che è stato prodotto nel Progetto Europeo denominato HELIDEM. Tale progetto aveva lo scopo di creare di un modello digitale del terreno (DTM) correttamente georeferenziato e multirisoluzione che integrasse tutte le informazioni disponibili per la fascia alpina e subalpina tra Italia -Piemonte e Lombardia -e Svizzera -Cantoni Ticino, Grigioni e Vallese. Tale modello, rispetto ai modelli digitali della regione Lombardia e quelli nazionali, ha il vantaggio di integrare anche la regione Svizzera della Valle del Poschiavo, parte integrante del bacino del fiume Adda. In aggiunta tale modello presenta una risoluzione spaziale migliore rispetto agli altri prodotti preesistenti. Il modello digitale del terreno per l'area in esame è riportato in Figura 2.4.3.2 nella quale vengono indicati anche i bacini di interesse allo studio:

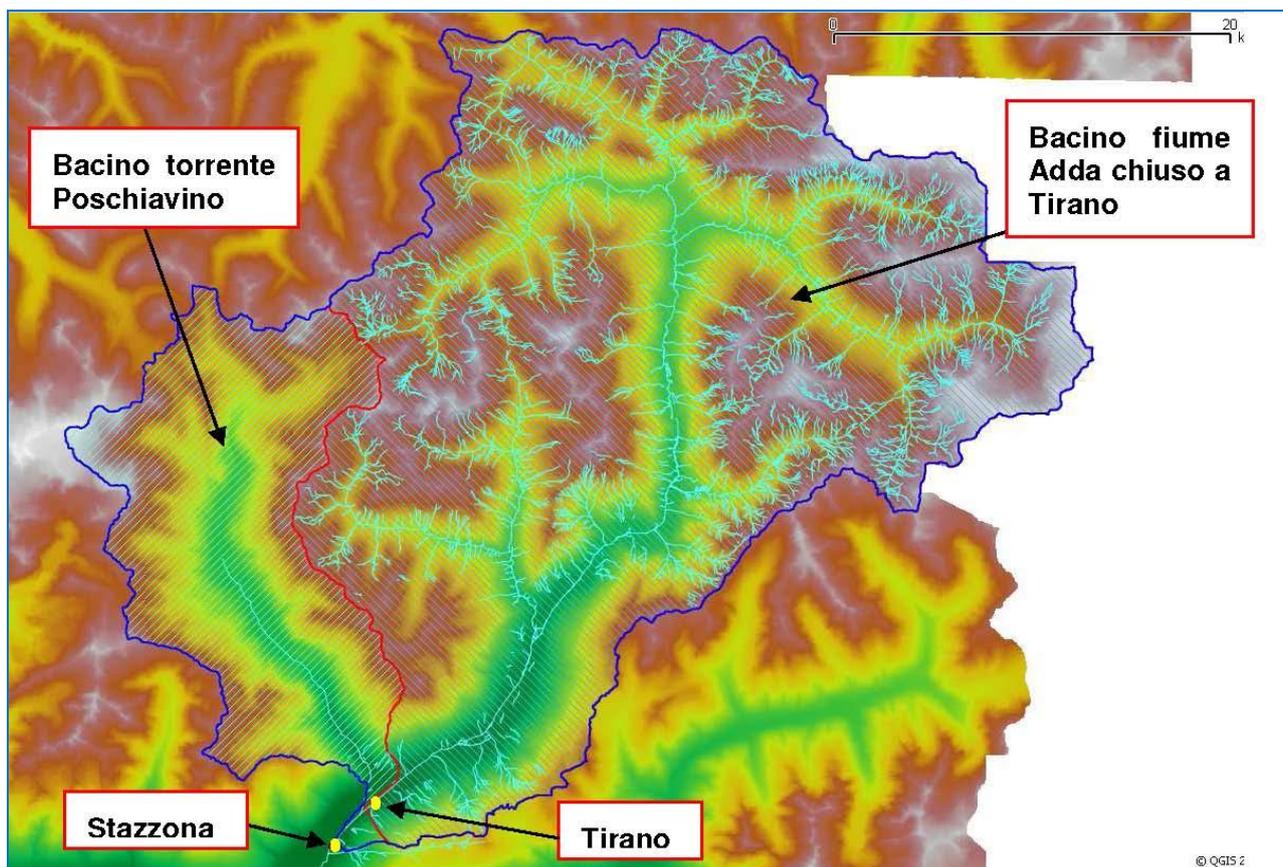


Figura 2.4.3.2: Modello digitale del terreno dell'area con indicazione del bacino dell'Adda chiuso a Tirano, del bacino del Poschiavino e dell'Adda chiuso al ponte di Stazzona.

Andando nel dettaglio dei compluvi idrografici di interesse per l'analisi idrologica (Figura 2.4.3.2) si riportano nelle tabelle seguenti le caratteristiche morfologiche del bacino dell'Adda chiuso a Tirano, del bacino del torrente Poschiavino chiuso alla confluenza con l'Adda e del bacino dell'Adda chiuso al ponte esistente di Stazzona:

Area Bacino [km ²]	243
Altitudine media [m s.l.m.]	2012
Altitudine minima [m s.l.m.]	410
Altitudine massima [m s.l.m.]	3898

Tabella 2.4.3.a: Caratteristiche geografiche bacino del torrente Poschiavino chiuso alla confluenza con l'Adda a quota 410 m s.l.m.

Area Bacino [km ²]	898
Altitudine media [m s.l.m.]	2145
Altitudine minima [m s.l.m.]	411
Altitudine massima [m s.l.m.]	3753

Tabella 2.4.3.b: Caratteristiche geografiche bacino del fiume Adda chiuso a Tirano a quota 411 m s.l.m.

Area Bacino [km ²]	1139
Altitudine media [m s.l.m.]	2109
Altitudine minima [m s.l.m.]	393
Altitudine massima [m s.l.m.]	3898

Tabella 2.4.3.c: Caratteristiche geografiche bacino del fiume Adda chiuso a Stazzona a quota 393 m. s.l.m.

A partire dal modello digitale del terreno sono state ricavate le mappe propedeutiche all'applicazione del modello idrologico ad afflussi/deflussi AdB-Toolbox. In particolare si riportano nelle figure seguenti il modello digitale del terreno dopo l'operazione di "depitching" (Figura 2.4.3.3), la mappa delle direzioni di drenaggio (Figura 2.4.3.4) e la mappa delle aree cumulate per la definizione del reticolo di deflusso (Figura 2.4.3.5).

Al fine della modellazione idrologica su un bacino delle dimensioni superiori ai 1000 km² la risoluzione spaziale di 30 m x 30 m è apparsa più che sufficiente allo scopo dell'analisi consentendo, tra l'altro, tempi di calcolo minori.

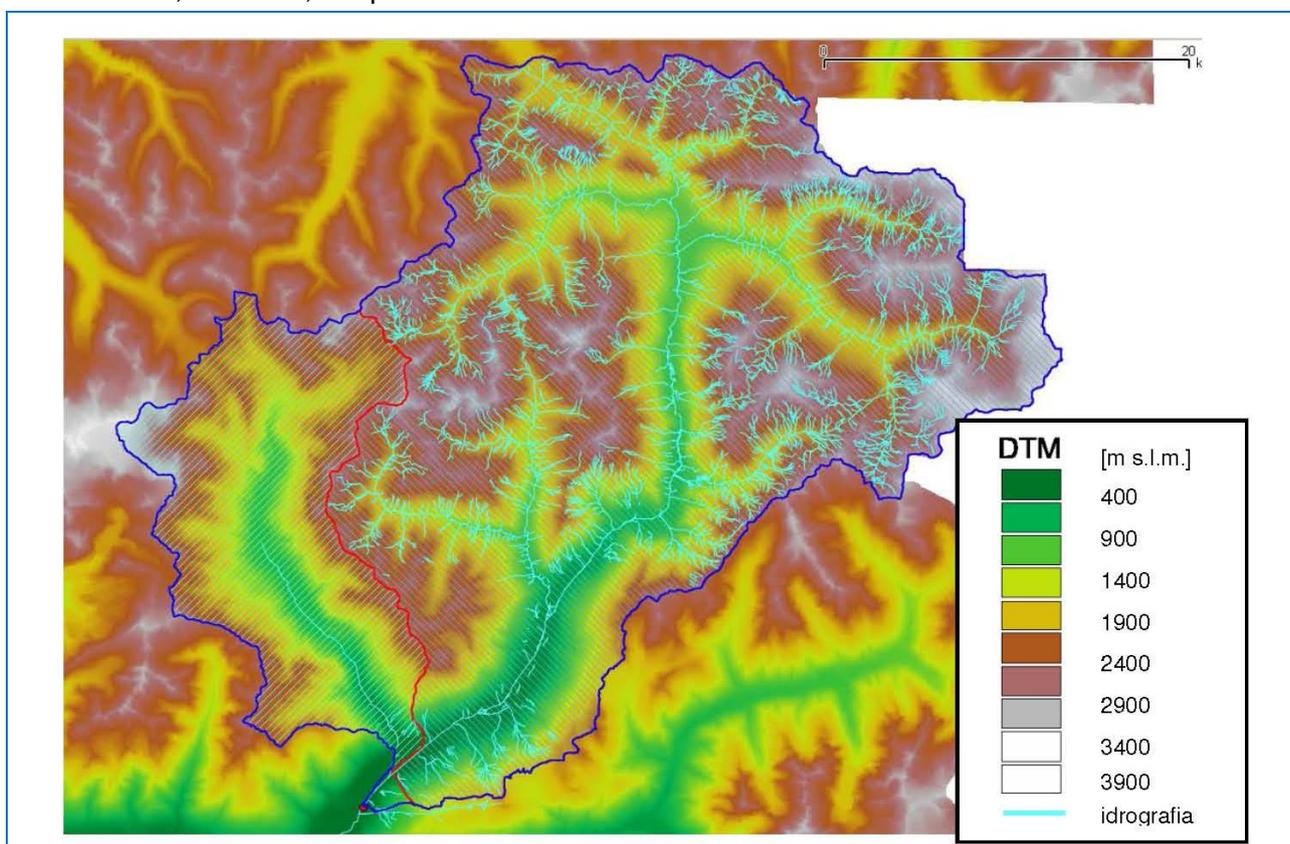


Figura 2.4.3.3: Modello digitale del terreno depittato del fiume Adda chiuso a Stazzona con indicazione dell'idrografia dell'area.

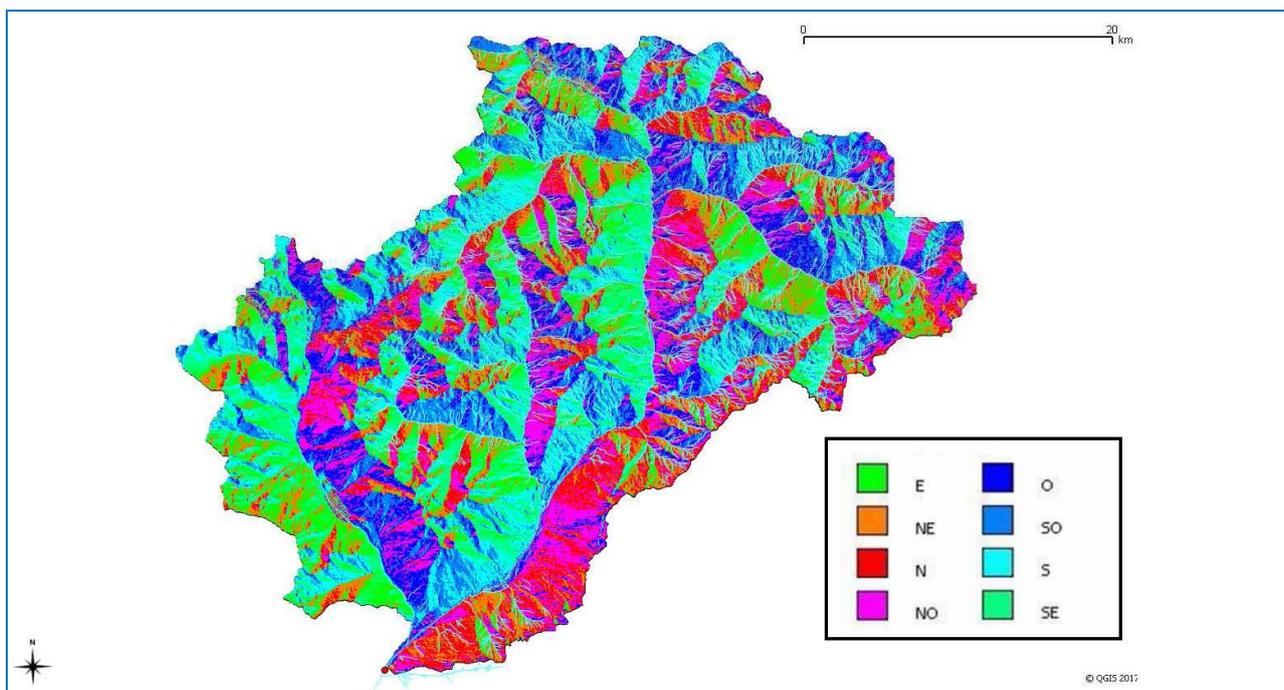


Figura 2.4.3.4: Bacino del fiume Adda chiuso a Stazzona su carta delle direzioni di deflusso.

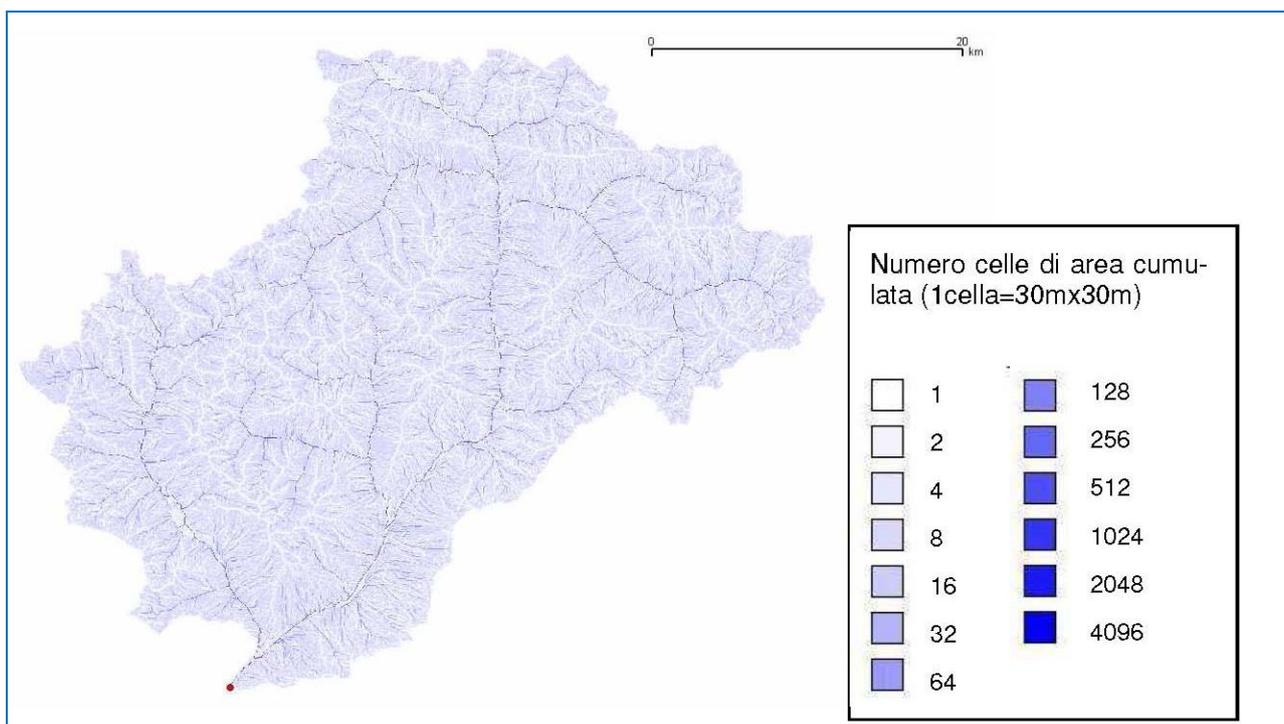


Figura 2.4.3.5: Bacino del fiume Adda chiuso a Stazzona su carta dell'area di drenaggio cumulata.

L'ultima mappa di grande importanza per la modellazione idrologica è quella del cosiddetto "Curve Number", il quale nei modelli ad afflussi/deflussi discrimina la precipitazione insistente sul terreno differenziandola tra quella che si infila inizialmente nel terreno e quella che contribuisce direttamente al deflusso.

La mappa del Curve Number è ottenuta partendo dalle carte della litologia e dell'uso del suolo del bacino idrografico che permettono di definire la capacità drenante del sistema suolo-soprassuolo e di procedere contestualmente alla determinazione dello ietogramma efficace ai fini del deflusso superficiale. La carta dell'uso del suolo permette di caratterizzare la capacità di deflusso del

soprasuolo, mentre la carta della permeabilità è rappresentativa del substrato geolitologico, che è dotato di una permeabilità primaria, collegata alle caratteristiche intrinseche della roccia, e di una permeabilità secondaria, rappresentativa dello stato di fratturazione.

Per quanto riguarda la parte del bacino dell'Adda in territorio italiano, la regione Lombardia fornisce già una mappa dei valori del parametro CN con una risoluzione di 5 x 5 m. In questo caso, tuttavia, è stato necessario integrare questa informazione con la parte di bacino in territorio elvetico nella valle del Poschiavo. A tale scopo si provveduto a reperire i file vettoriali della mappa di uso del suolo per la valle del Poschiavo dal geoportale cartografico della Svizzera e successivamente si è assegnato il valore del Curve Number a ciascuna area assegnandolo anche sulla base delle caratteristiche litologiche. La carta del Curve Number è stata ottenuta, infine, rasterizzando i file vettoriali e unendo le mappe della regione Lombardia con quelle della Svizzera, con la medesima risoluzione di 30 m. Il risultato della mappa del parametro CN per il bacino dell'Adda chiuso al ponte di Stazzona è riportata in Figura 2.4.3.6.

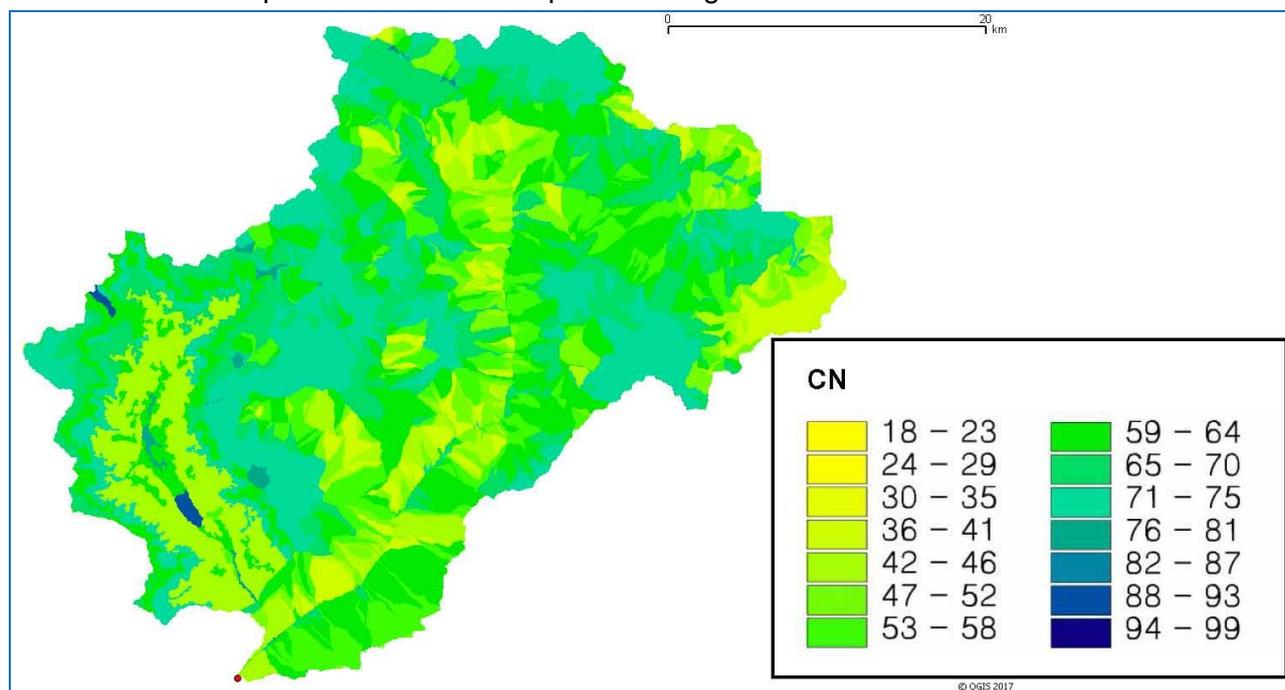


Figura 2.4.3.6: Bacino del fiume Adda a Stazzona su carta del parametro CN (Curve Number)

Valutazione della portata al colmo con il modello idrologico AdB-Toolbox

Il calcolo dell'idrogramma di portata per l'evento piovoso in esame è stato effettuato per mezzo di un modello afflussi-deflussi denominato AdB-Toolbox realizzato a cura del Ministero dell'Ambiente. L'estensione Analisi Idrologiche, compresa nel software, consente il calcolo delle portate di progetto su specifiche sezioni della rete idrografica. Si riportano di seguito alcune indicazioni presenti nel manuale d'uso.

Per eseguire le simulazioni sono necessari i seguenti livelli informativi:

- il modello digitale del terreno per definire la direzione di deflusso, l'area contribuente, il reticolo idrografico;
- la mappa del parametro Curve Number -CN;
- i parametri cinematici della propagazione dell'onda di piena quali la velocità media sul versante e nel canale;
- le precipitazioni di progetto per l'evento da simulare.

Dati di input

Si descrivono di seguito i dati di input utilizzati per effettuare le simulazioni. Il modello digitale del terreno (DTM) è un raster ottenuto dal dataset HELIDEM prodotto all'interno dell'omonimo Progetto Europeo. La risoluzione prescelta, come precedentemente ricordato, è una maglia di 30 x 30 m. L'operazione preliminare è stata quella di "depittare" il DTM con un algoritmo presente in AdB-Toolbox eliminando così le aree concave; fatto ciò è stato possibile creare gli altri raster per il modello afflussi-deflussi denominati UPSLOPE e FLOWDIR che sono rispettivamente la carta delle aree cumulate e la carta delle direzioni di drenaggio. Come già ricordato la carta del Curve Number è ottenuta rasterizzando, con la medesima risoluzione di 30 m, la carta del CN della regione Lombardia, unita con l'analoga mappa ricavata per la valle del Poschiavo in Svizzera. La scelta dei parametri cinematici (nel software indicati come "parametri avanzati") è stata guidata dalla calibrazione dei parametri cinematici del modello afflussi-deflussi effettuata in passato per bacini idrografici di dimensioni paragonabili a quelle in esame. Per gli altri parametri per i quali non esistono in letteratura indicazioni specifiche, si sono mantenuti i valori di default suggeriti dal software.

I parametri cinematici utilizzati per la propagazione del deflusso sono riassunti di seguito:

- Velocità caratteristica di versante minima = 0.02 m/s
- Velocità caratteristica di versante massima = 0.05 m/s
- Velocità caratteristica di reticolo = 2.5 m/s
- Valore di soglia per l'area drenata = 0.2 km²
- Forma dello ietogramma triangolare
- Classe AMC 2
- Step output dell'idrogramma 15 min

La classe AMC scelta è la 2, mentre lo ietogramma in input è stato scelto di forma triangolare in quanto tende a massimizzare il valore al picco della piena. La classe AMC non è stata massimizzata al valore di 3 in quanto per un bacino così grandi dimensioni immaginare la completa saturazione del suolo in ogni parte del bacino appare un'ipotesi fin troppo cautelativa e molto poco realistica.

La scelta dei parametri caratteristici "a" ed "n" per la distribuzione di Gumbel e la realizzazione dell'idrogramma di pioggia di progetto in input al modello idrologico AdB-Toolbox meritano un approfondimento. Inizialmente si è partiti dalle informazioni sui parametri delle curve di possibilità pluviometrica messi a disposizione dalla regione Lombardia sul portale Idrologico-Geografico. In particolare all'interno di un recente progetto INTERREG IV/A STRADA (Strategie di Adattamento ai cambiamenti climatici per la gestione dei rischi naturali nel territorio transfrontaliero), frutto di una collaborazione transfrontaliera tra Italia e Svizzera, sono state analizzate le serie delle precipitazioni e le curve di possibilità pluviometrica sono state ricostruite per ogni punto del territorio regionale, implementando un raster con maglia 1.5 km, come riportato in Figura 2.4.3.7.

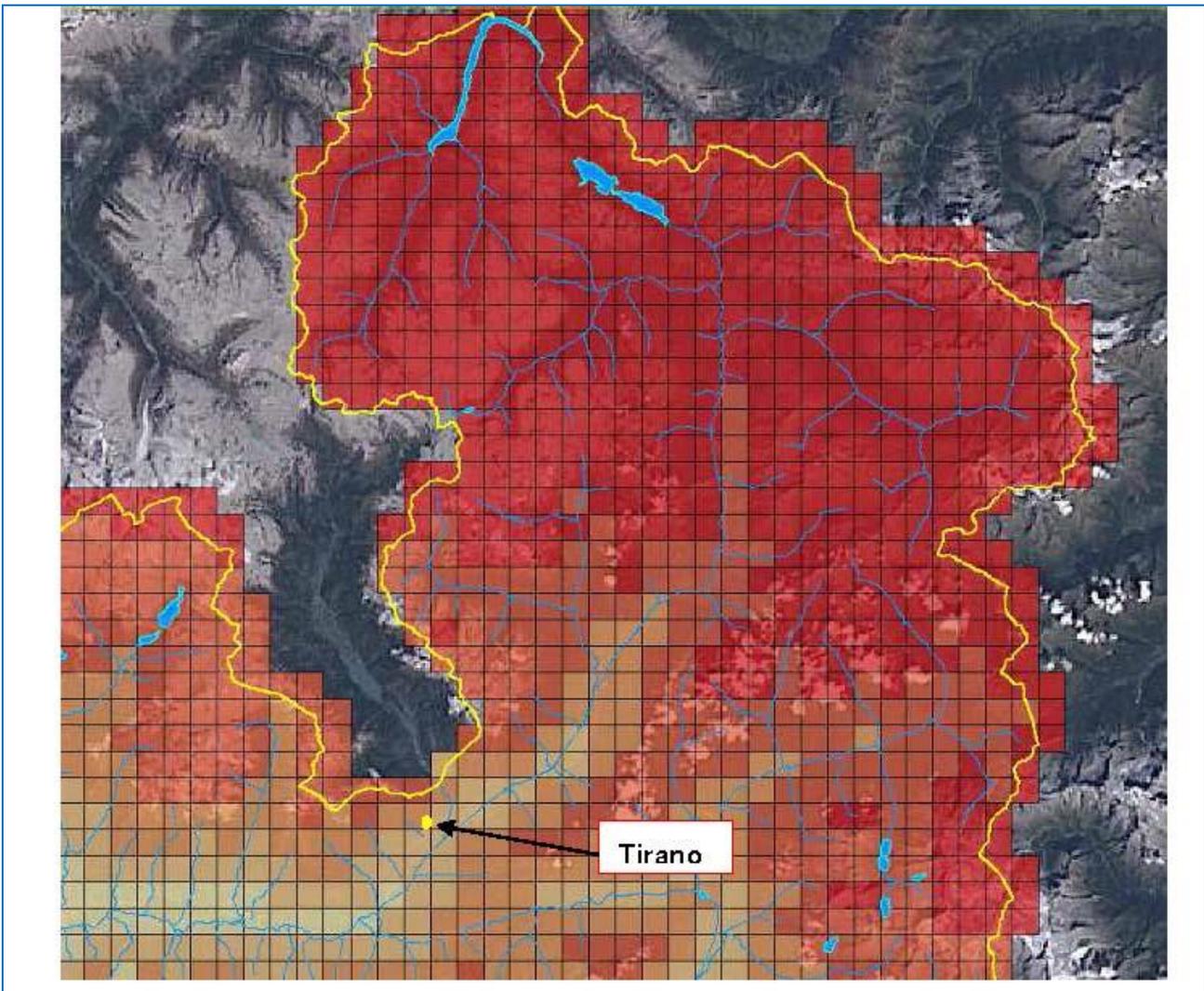


Figura 2.4.3.7: Mappa del raster contenente i parametri delle curve di possibilità pluviometrica per l'area di interesse ottenute dal progetto STRADA.

Sul portale Idrologico-Geografico è possibile effettuare il download di tali mappe che riportano, per ogni cella, i parametri caratteristici della distribuzione GEV sulla base della seguente formulazione analitica:

$$h_T(D) = a_1 w_T D^n$$

$$w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]^k \right\}$$

dove:

D= durata della precipitazione;

T= tempo di ritorno;

a_1 = coefficiente pluviometrico orario;

n = coefficiente di scala;

GEV – parametro α ;

GEV – parametro k ;

GEV – parametro ε .

L'operazione successiva è stata quella di ritagliare tali mappe sul bacino idrografico in esame ed è

stata effettuata un'operazione di media per ottenere un raster che avesse i parametri mediati sull'intero bacino. In particolare il risultato ha portato ai seguenti valori dei parametri della distribuzione GEV:

a_1 = coefficiente pluviometrico orario = 21,91;

n = coefficiente di scala = 0,3771;

GEV – parametro α = 0,293;

GEV – parametro k = -0,131;

GEV – parametro ε = 0,782.

Sulla base di questi parametri è stato possibile ricostruire le curve di possibilità pluviometrica mediate sul bacino dell'Adda al variare della durata di pioggia e del tempo di ritorno. Tali curve sono riportate in Figura 2.4.3.8.

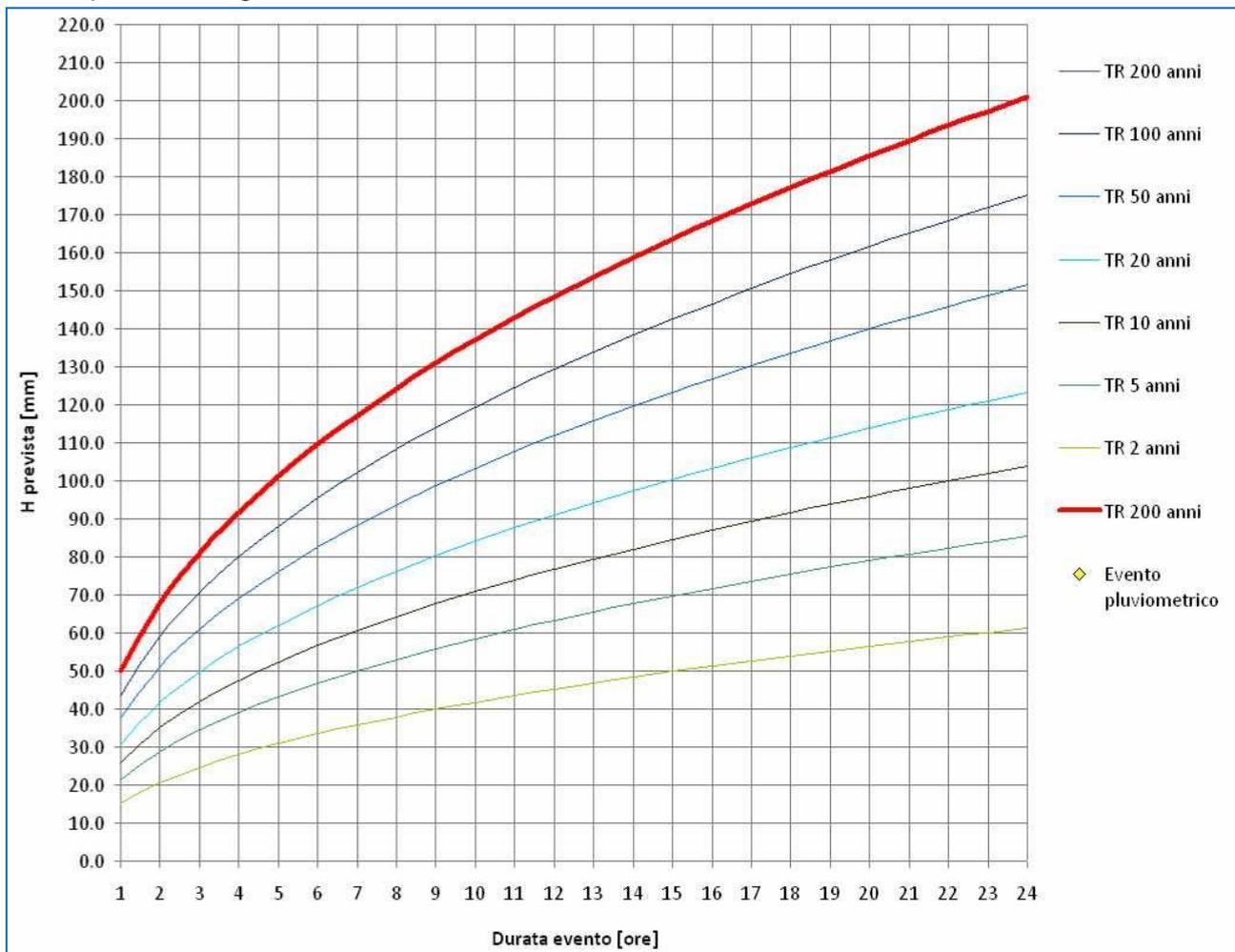


Figura 2.4.3.8: Curve di possibilità pluviometrica sulla base dei valori della distribuzione GEV mediati sul bacino dell'Adda chiuso a Stazzona.

Per il caso della modellazione idrologica in esame il tempo di ritorno prescelto sono i 200 anni e per tale tempo di ritorno sono stati ricavati anche i parametri caratteristici "a" ed "n" della distribuzione di GUMBEL. La Figura 2.4.3.9 riporta la curva per il Tr 200 con indicazione dell'equazione con i parametri di Gumbel.

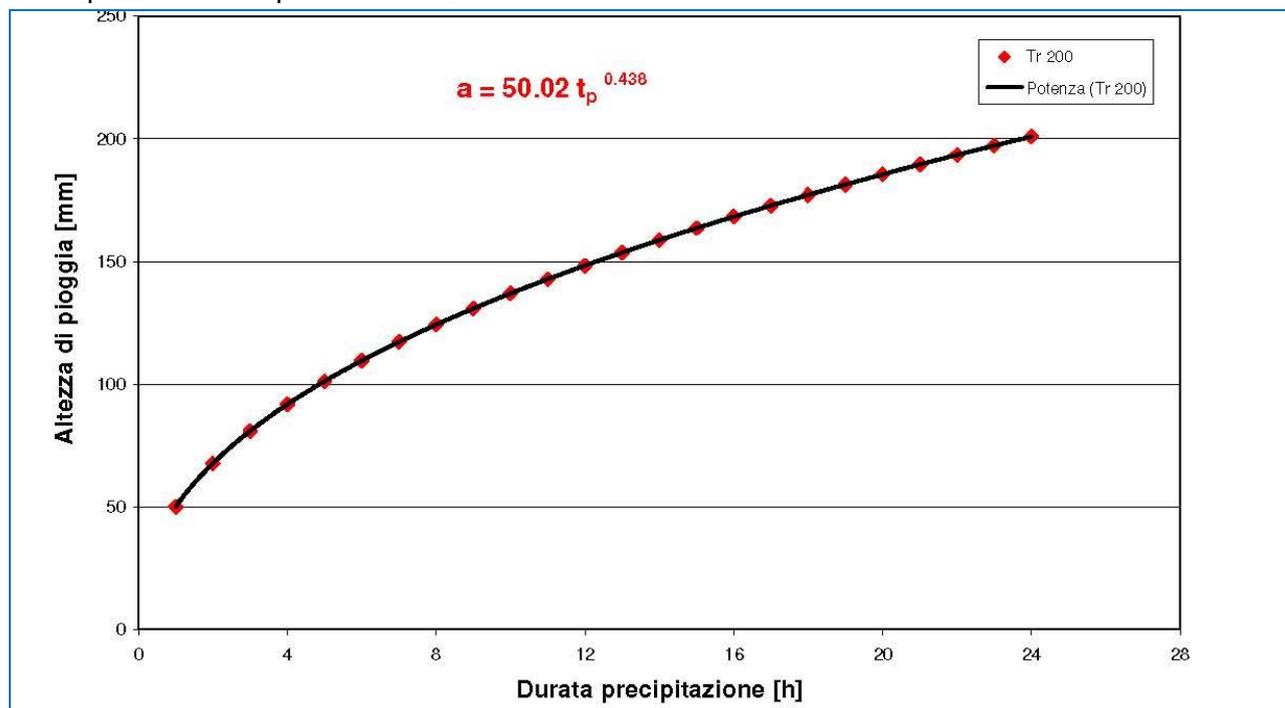


Figura 2.4.3.9: Curva di possibilità pluviometrica per il tempo di ritorno di 200 anni con equazione die parametri a ed n secondo Gumbel.

La variabilità spazio-temporale della precipitazione a scala di bacino è un fattore importante che mette in conto il fatto che, per bacini di grandi dimensioni, non è pensabile immaginare una precipitazione massimale in ogni punto del bacino. Tale fattore è messo in conto tramite il coefficiente di riduzione dell'area (Area Reduction Factor, ARF). In mancanza di informazioni specifiche derivate da approfondimenti a scala locale, si fa riferimento alla funzione di riduzione dei nubifragi ricavata da Moisello e Papiri (1986), tra le più utilizzate in letteratura. In tale relazione empirica il fattore di riduzione (inteso come rapporto tra l'altezza di pioggia media, relativa ad una data area A, e l'altezza di pioggia puntuale rappresentativa del bacino) risulta dipendente sia dall'area A, che della durata della precipitazione "d", secondo la relazione:

$$ARF = 1 - \exp(-2.472A^{-0.242} D^{0.6} - \exp(-0.643A^{0.2255}))$$

Dove l'area è espressa in km² e la durata in ore, e con 5 ≤ A ≤ 1000 km² e 15 ≤ d ≤ 12 h. La precipitazione cumulata per un determinato tempo di pioggia è quindi diminuita tramite il parametro ARF e da questo valore ridotto di precipitazione si procede alla costruzione dello ietogramma di progetto. Si riporta in Figura 2.4.3.10 l'esempio dello ietogramma di precipitazione triangolare per un tempo di pioggia pari a 6 h con precipitazione cumulata pari a 78 mm.

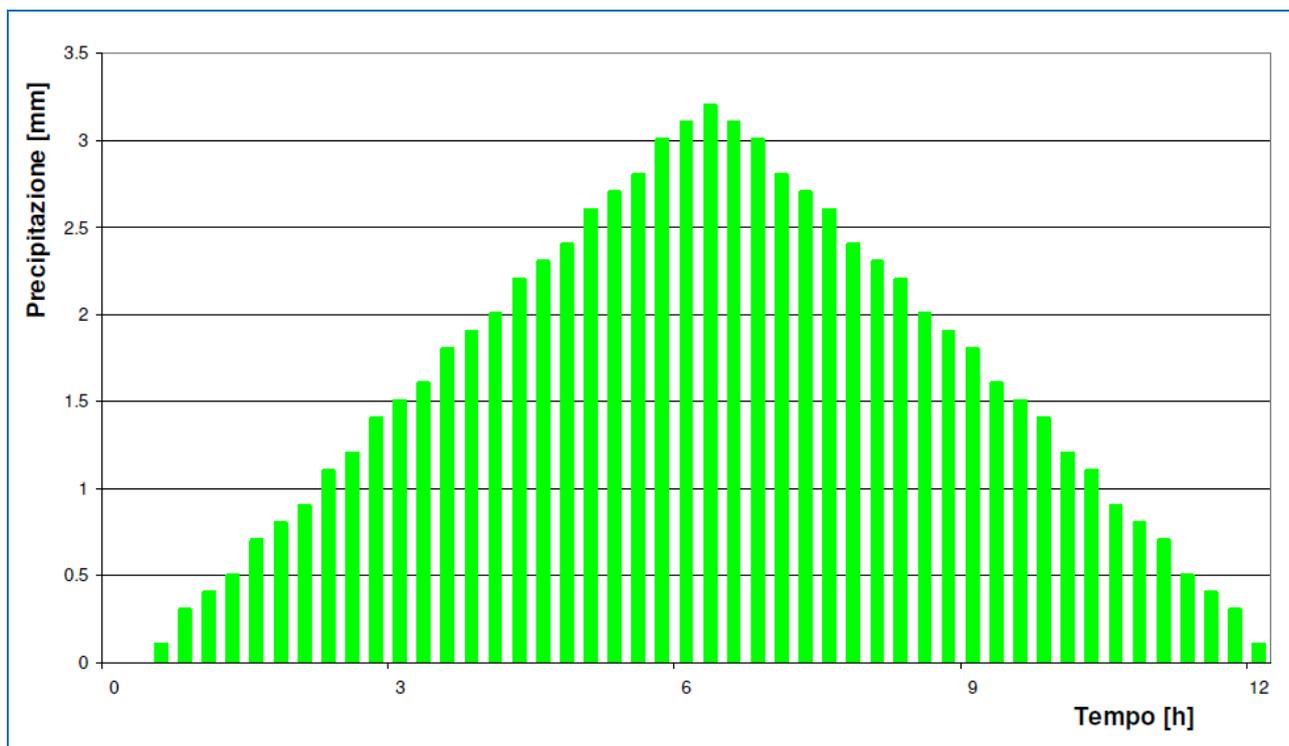


Figura 2.4.3.10: Istogramma triangolare di progetto per il tempo di pioggia di 6 ore

A questo punto è stato necessario individuare la durata della pioggia che mettesse in crisi il bacino del fiume Adda. Per fare questo si è dapprima ricavata la mappa dei tempi di corrvazione di ogni punto del bacino ottenuta dal software AdB-Toolbox a partire dal modello digitale del terreno e dalla mappa delle aree cumulate. Tale mappa è sintetizzata nell'istogramma di Figura 2.4.3.11 dove si vede la distribuzione delle aree contribuenti al deflusso del bacino al variare delle varie fasce di tempo. Come si può notare si ha una distribuzione bimodale dove si ha un picco contribuente intorno alle 5 ore e un altro a 8.5 ore. Tale risultato fornisce una prima indicazione sul tempo di pioggia da utilizzare.

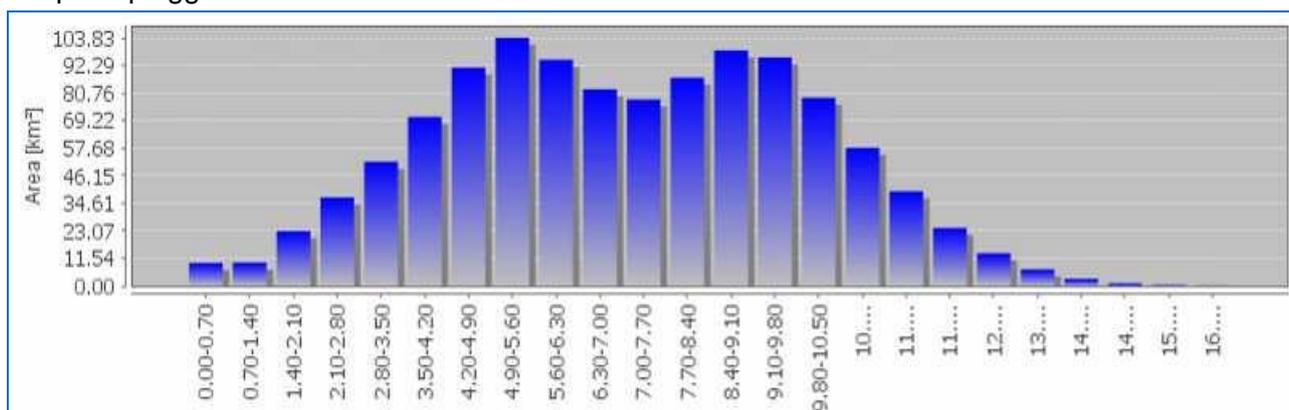


Figura 2.4.3.11: Istogramma delle aree contribuenti al variare del tempo di residenza all'interno del bacino

Sulla base di queste informazioni il modello idrologico è stato applicato utilizzando istogrammi con differenti tempi di pioggia e le simulazioni hanno mostrato come il tempo di pioggia pari a 6 ore sia quello che mette maggiormente in crisi il bacino dando una portata al picco maggiore.

Risultati del modello afflussi-deflussi

Vengono di seguito riportati i risultati della modellazione idrologica partendo dalle mappe di input, dai parametri cinematici prescelti e dallo ietogramma di progetto per il tempo di pioggia di 6 h. La Figura 2.4.3.12 mostra lo ietogramma riportante la precipitazione totale insistente sul bacino e quella efficace, cioè quella che contribuisce direttamente al deflusso.

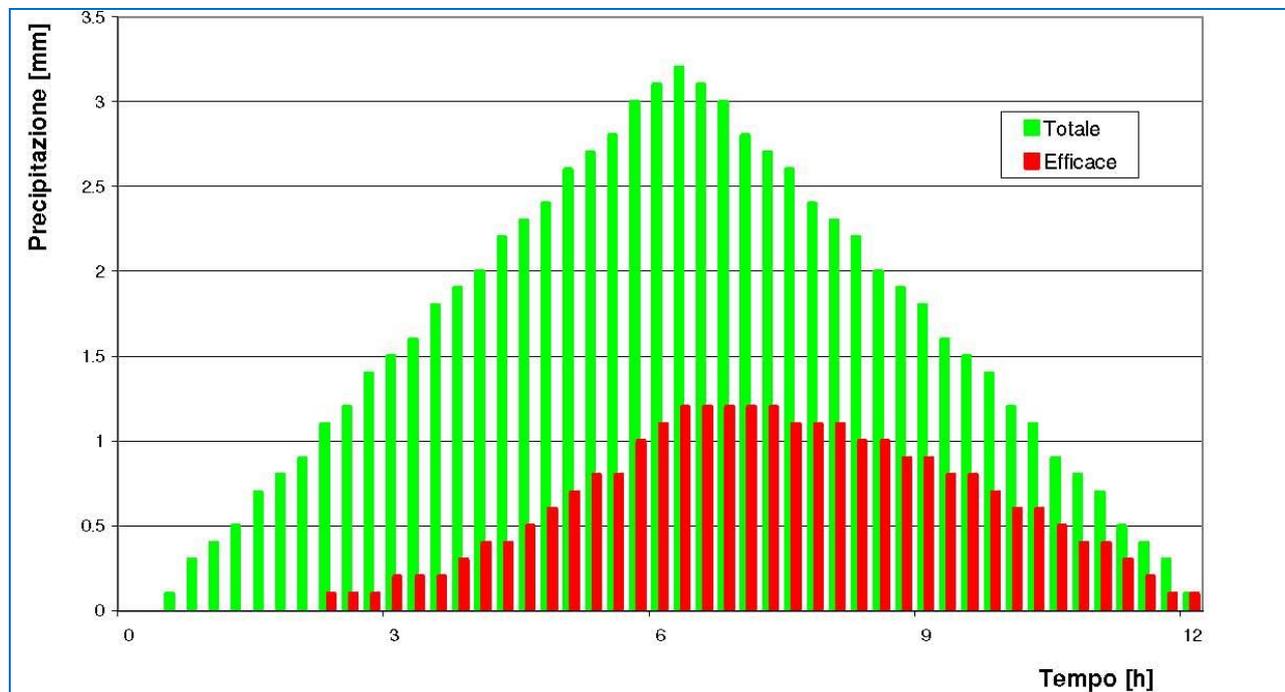


Figura 2.4.3.12: ietogramma di progetto utilizzato per la determinazione dell'idrogramma di piena. (Totale indica la pioggia totale, Efficace indica la pioggia efficace).

La Figura 2.4.3.13 riporta l'idrogramma di portata calcolato per il bacino del fiume Adda chiuso alla sezione di Tirano a monte della confluenza con il Poschiavino, mentre la Figura 2.4.3.14 mostra l'idrogramma calcolato per la sezione di chiusura del ponte di Stazzona, a valle della confluenza con il Poschiavino.

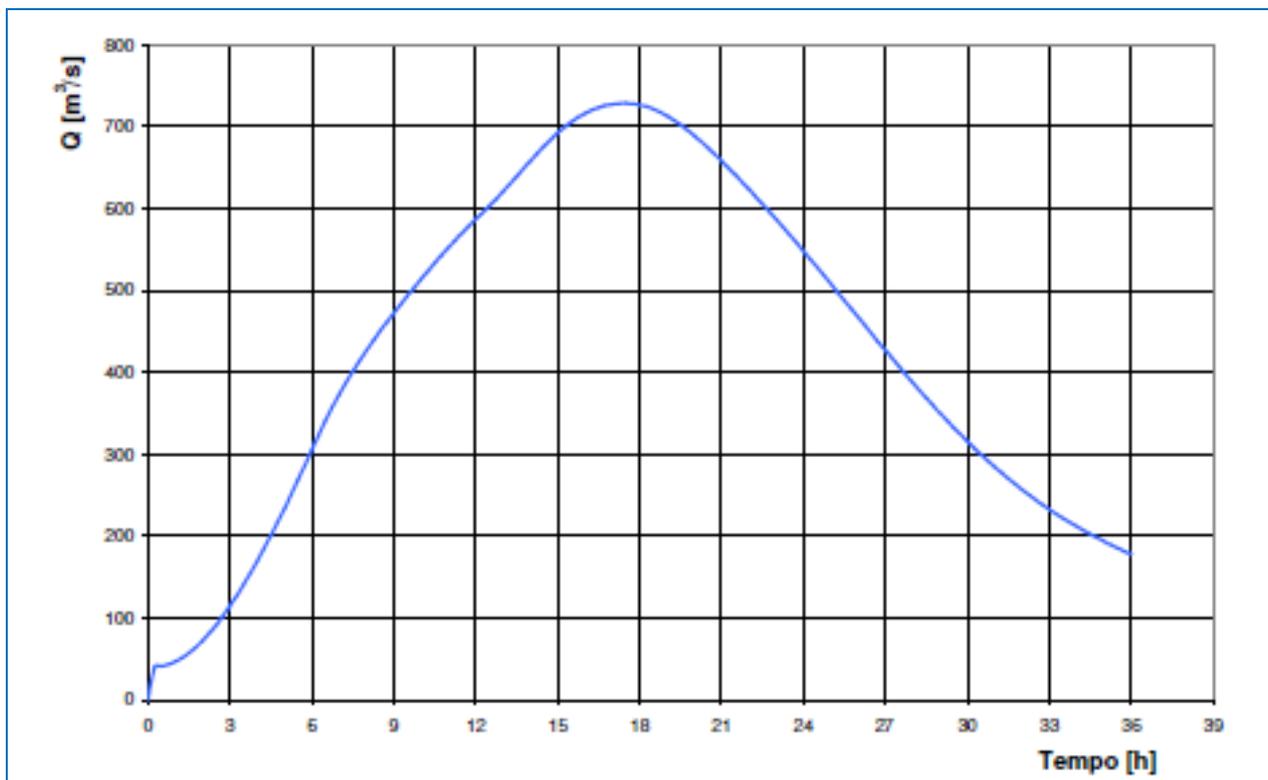


Figura 2.4.3.13: Idrogramma di piena per il tempo di ritorno di 200 anni per la sezione di chiusura del ponte di Tirano a monte della confluenza con il torrente Poschiavino

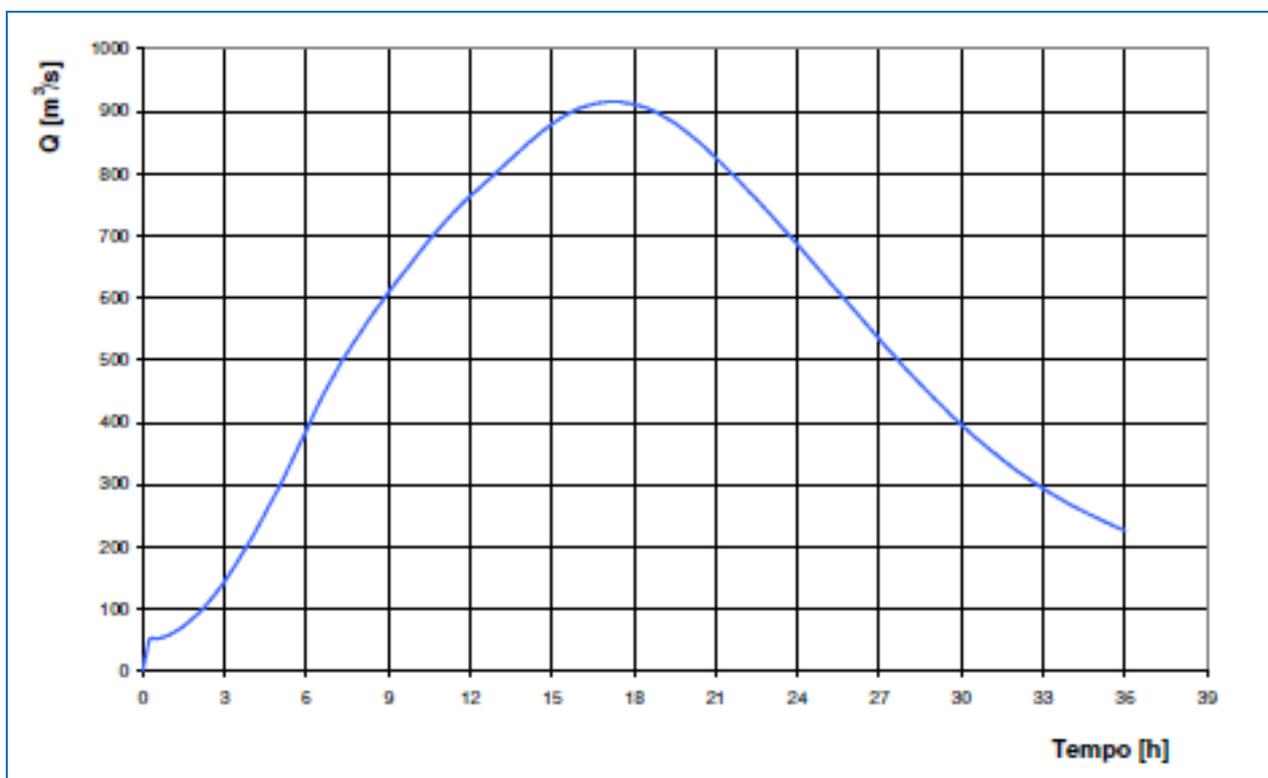


Figura 2.4.3.14: Idrogramma di piena per il tempo di ritorno di 200 anni per la sezione di chiusura del ponte di Stazzona a valle della confluenza con il torrente Poschiavino

La Tabella 2.4.3.d riporta i valori di portata al colmo per le due sezioni di chiusura:

Q Tr 200 [m ³ /s]	
Sezione Tirano	Sezione Stazzona a valle del Poschiavino
728	914

Tabella 2.4.3.d: Portate al colmo della piena stimate presso la sezione di chiusura di Tirano e presso il ponte di Stazzona.

Sia il valore della portata al colmo a valle della confluenza con il Poschiavino che quello a Tirano risultano in linea con i vari studi di letteratura che non si basavano sulla modellazione idrologica, ma bensì sull'analisi statistica delle portate o partendo dalla regionalizzazione delle precipitazioni.

3.5 PORTATE DI PROGETTO

Nella Tabella 2.4.3.e vengono riassunte le portate al colmo per il tempo di ritorno di 200 anni stimate dai vari studi di letteratura per la sezione di Tirano a monte del Poschiavino e per la sezione di Stazzona a valle del Poschiavino. L'ultima riga riporta i valori stimati tramite la modellazione idrologica di questo studio.

Studio	Q ₂₀₀ [m ³ /s]	
	A Tirano	A valle del Poschiavino
ISMES-CAE	451	-
Italtekna	475÷625	-
Pro.I.Ter	830	1055
P.A.I.	720*	830*
AIPo	750	920
Baggini-Begnig	830	917
Modellazione idrologica	728	914

Tabella 2.4.3.e: Portate al colmo della piena valutate nei vari studi analizzati e nella presente modellazione idrologica.

Nella simulazione idrologica la portata al colmo nella sezione a valle del Poschiavino (Stazzona) per il tempo di ritorno di 200 anni si avvicina molto a quello dello studio Baggini -Begnig e dell'AIPo, e si è scelto di porre 917 m³/s come valore di progetto per la verifica delle opere. Per quanto riguarda la sezione a monte della confluenza (Tirano) la modellazione idrologica restituisce un valore inferiore, 728 m³/s, rispetto allo studio Baggini-Begnig. Nonostante appaia più ragionevole una portata contribuente del bacino del Poschiavino così come suggerita dall'analisi idrologica, e cioè 186 m³/s, a favore di sicurezza si è deciso di adottare il valore di 830 m³/s come valore di progetto per il tratto a monte della confluenza (valore usato dal suddetto studio per la perimetrazione delle aree allagabili presso Tirano).

Si sottolinea che non è stata assunta la portata dello studio Pro.i.ter ($1055 \text{ m}^3/\text{s}$) in quanto, come già sottolineato dallo studio AIPO, l'extrapolazione della portata a valle del Poschiavino è partita da un errato posizionamento del valore di portata di $830 \text{ m}^3/\text{s}$ stimato dal PAI. Tale valore, infatti, si riferiva alla sezione immediatamente a valle del Poschiavino e non a monte, come erroneamente usato nello studio Pro.i.ter. Questo dato di partenza assegnato alla sezione di Tirano ha portato ad una valutazione della portata a valle della confluenza esagerata includendo l'area del bacino del Poschiavino che in realtà doveva già essere inclusa nella stima degli $830 \text{ m}^3/\text{s}$.

In considerazione di quanto precedentemente detto, per i tempi di ritorno di 100 e 200 anni, i valori di portata al colmo di progetto per le sezioni a monte ed a valle del Poschiavino sono state prese pari al valore indicato nello studio Baggini-Begnisi.

Per quanto concerne i tempi di ritorno inferiori ai 100 anni i valori di portata di progetto per il bacino a monte del Poschiavino sono stati fissati pari a quelli ricavati dall'analisi statistica della serie di portate a Tirano analizzate con metodologia statistica; per i Tr inferiori a 50 anni, infatti, è parsa sufficientemente affidabile l'analisi statistica basata su un numero di misure storiche pari a 36 (valore comparabile con i Tr per i quali è stata effettuata la stima). Per le portate a valle della confluenza con il Poschiavino, invece, non essendo più applicabile l'analisi statistica, si è deciso di applicare un coefficiente moltiplicativo pari 1.2. Tale valore è stato definito osservando il rapporto tra le portate a valle e a monte del Poschiavino stimate nello studio Baggini-Begnisi, pari a 1.10-1.14 ed il rapporto tra portata al colmo dell'idrogramma a valle della confluenza con il Poschiavino ed a monte della confluenza (Tirano) per il tempo di ritorno di 200 anni ottenute dall'analisi idrologica, pari a 1.24. Non è stato utilizzato il valore 1.24 ma il valore 1.20 in considerazione del fatto che per Tr inferiori ai 100 anni va anche considerata la presenza del lago di Poschiavo il quale, viste le sue dimensioni, in condizioni di piena non eccezionale fornisce certamente un'importante azione di laminazione della portata attenuando il picco della stessa.

In conclusione le portate al colmo di progetto per le due sezioni di chiusura di interesse per i vari tempi di ritorno analizzati sono riportate nella Tabella 2.4.3.f:

TR [anni]	2	5	10	20	100	200
Portata progetto Adda monte Poschiavino (Tirano)	178	285	368	456	750	830
Portata progetto Adda valle Poschiavino (Stazzona)	214	342	442	547	828	917

Tabella 2.4.3.f: Portate al colmo della piena di progetto utilizzate per le verifiche idrauliche al variare del tempo di ritorno, per le due sezioni di chiusura di interesse.