1	9/2018	REVISIONE	DUTTO	BERTERO	CASSANI
0	11/2017	PRIMA EMISSIONE	DUTTO	BERTERO	CASSANI
Revisione	**Data**	**Oggetto revisione**	**Redatto**	**Verificato**	**Approvato**

REGIONE LIGURIA

#ItaliaSicura
Presidenza del Consiglio dei Ministri

COMUNE DI GENOVA

PIANO STRALCIO PER LE AREE METROPOLITANE E LE AREE URBANE CON ALTO LIVELLO DI POPOLAZIONE ESPOSTA AL RISCHIO DI ALLUVIONI

Presidenza del Consiglio dei Ministri

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
COMMISSARIO STRAORDINARIO
delegato per l'attuazione degli interventi inseriti nell'A.d.P. del 16.09.2010 e ss.ii.
(ex art. 10 del D.L. n. 91 del 24.06.2014)

Commissario straordinario
Dott. Giovanni TOTI

PROGETTISTI

CAPOGRUPPO MANDATARIA:

ROCKSOIL S.p.A.
CONSULENZA E ASSISTENZA TECNICA
nel campo della GEOINGEGNERIA

MANDANTI:

art ambiente risorse territorio

HYDRODATA INGEGNERIA DELLE RISORSE IDRICHE

Ing. Mario CANGIANO

Ing. Paolo GALLO

Ing. Francesco DE SANCTIS

Dott.ssa Francesca GIOMI

RESPONSABILE STRUTTURA COMMISSARIALE: **Ing. Luca BERRUTI**

RESPONSABILE UNICO PROCEDIMENTO: **Ing. Stefano PINASCO**

Progettista responsabile integrazioni prestazioni specialistiche e Direttore Tecnico della mandataria.
Rocksoil S.p.A.
Ing. Giovanna Cassani
Ord. Ingg. Milano N° 20997

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI MILANO
DOTT. ING. CASSANI GIOVANNA
Sez. A Settori:
a) civile e ambientale
b) industriale
c) dell'informazione
n° A 20997

Progettista/Progettisti responsabili elaborato
Hydrodata S.p.A.
Ing. Roberto Bertero
Ord. Ingg. Torino N° 7570L

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI TORINO
Dott. Ing. ROBERTO BERTERO n. 7570 L

Intervento/Opera

SECONDO LOTTO DEI LAVORI RELATIVI ALLA REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA SCOLMATRICE DEL TORRENTE BISAGNO IN COMUNE DI GENOVA

PROGETTO ESECUTIVO

N° Progr. ----

Codice elaborato: BIS2E - H - SDB04 - RE01 - 1

Oggetto della tavola

STUDI DI BASE
IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idrologica

Scala

Data: 14 SETT. 2018

Codice FILE: BIS2E-H-SDB04-RE01-1.DWG

I DISEGNI E LE INFORMAZIONI IN ESSI CONTENUTE SONO PROPRIETA' ESCLUSIVA DELLA STRUTTURA COMMISSARIALE E NON POSSONO ESSERE MODIFICATI, RIPRODOTTI, RESI PUBBLICI O UTILIZZATI PER USI DIFFERENTI DA QUELLI PER CUI SONO STATI REDATTI, SALVO AUTORIZZAZIONE SCRITTA.

INDICE

1 PREMESSA 2
2 PLUVIOMETRIA 2
2.1 Metodologia generale 2
2.2 Determinazione delle piogge intense per l'asta principale e gli affluenti in sponda sinistra 3
2.3 Determinazione delle piogge intense per gli affluenti in sponda destra dal Veilino al Ruinà 8
3 PORTATE DI RIFERIMENTO 13
3.1 Metodologia di analisi 13
3.2 Caratteristiche dei bacini idrografici 14
3.3 Regime idrologico ordinario 17
3.4 Portate di piena di riferimento 18
3.5 Portate di progetto 22
4 AGGIORNAMENTO DELL'ANALISI IDROLOGICA 25
4.1 Aggiornamento dell'analisi delle piogge intense dell'asta principale e degli affluenti in sponda sinistra 25
4.1.1 Estensione della base dati con le osservazioni recenti disponibili 25
4.1.2 Analisi mediante le distribuzioni probabilistiche Log-normale, Gamma e Gumbel 30
4.1.3 Analisi mediante modello lognormale dissipativo 35
4.2 Verifica della necessità di aggiornamento delle portate di piena del torrente Bisagno 42
5 CONDIZIONE AL CONTORNO DI VALLE: DETERMINAZIONE DEL LIVELLO DI MARE 46

1 PREMESSA

Il presente elaborato costituisce Relazione Idrologica del progetto esecutivo del 2° lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno in comune di Genova.

Nel seguito si riporta una definizione della pluviometria dell'area di interesse, con individuazione delle piogge intense di riferimento, nonché la determinazione delle portate di piena.

Tutti i dati riportati sono stati estratti da quanto riportato in fonti ufficiali e, principalmente, dal Piano di bacino stralcio (PdB) del torrente Bisagno.

A seguito di specifica richiesta da parte del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, si è proceduto all'aggiornamento dell'informazione pluviometrica (in termini di piogge intense – linee di possibilità climatica) contenuta nel PdB, verificando conseguentemente l'adeguatezza dei valori di portata di progetto assunti alla base della progettazione.

2 PLUVIOMETRIA

2.1 Metodologia generale

Come descritto nel Piano di Bacino stralcio del torrente Bisagno, *"Il regime pluviometrico dell'area in esame risulta intermedio fra il tipo sublitoraneo appenninico e quello marittimo, con un massimo assoluto in autunno (novembre) ed un minimo assoluto in estate (luglio). Esso presenta anche un massimo e un minimo relativo rispettivamente, in primavera e in inverno. La precipitazione media annua oscilla fra 1000 e 1500 mm, con punte che, in qualche caso, raggiungono 2000 mm (a Scoffera, per esempio, 2015 mm)."*

Per quanto concerne la determinazione delle piogge intense, l'analisi dei dati pluviometrici e la conseguente definizione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, che individuano per ogni tempo di ritorno di interesse l'altezza massima annuale di pioggia per date durate, è stata effettuata all'interno del medesimo Piano di bacino sopracitato, dal quale sono stati estratti i dati che seguono.

In sintesi, per quanto riguarda i modelli probabilistici adottati al fine di determinare tali linee segnalatrici per il bacino del Bisagno, esclusi gli affluenti di destra dal Veilino al Ruinà, sono stati esaminati due metodi identificabili come "modello lognormale scala-invariante" e "modello lognormale dissipativo".

"Per il calcolo delle linee segnalatrici relativo ciascuna stazione è stato quindi adottato il modello lognormale dissipativo che, benché presenti una formulazione più complessa, ha fornito stime dell'altezza di pioggia più attendibili per il bacino nel suo complesso; esso presenta infatti, in generale, un buon adeguamento alle osservazioni.

Per la restante parte di bacino le elaborazioni sulle serie storiche di dati pluviometrici sono state invece condotte interpretando probabilisticamente le altezze di pioggia massime annuali per ciascuna durata utilizzando la legge probabilistica asintotica del massimo valore (legge di Gumbel), tradizionalmente impiegata per la determinazione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica.

In virtù delle definizioni precedenti, la determinazione delle linee segnalatrici richiede una preliminare elaborazione degli ietogrammi registrati dalla stazione pluviografica in esame. In base alle registrazioni continue del processo va ricostruito un campione di osservazioni sperimentali della variabile aleatoria altezza di pioggia massima H(d) per ogni valore di durata d di interesse tecnico: si ottiene in tal modo una serie di altezze di pioggia massime per ogni diversa durata di integrazione presa in esame.

I dati sono stati ricavati dagli Annali Idrologici del Servizio Idrografico e Mareografico Italiano, Parte I, Sezione Autonoma del Genio Civile con sede in Genova per i bacini con foce al litorale tirrenico dal Roja

al Magra; le informazioni relative alle stazioni sono state tratte dall'elenco delle stazioni termopluviometriche del Servizio Idrografico Italiano, pubblicazione n. 27, Ministero dei Lavori Pubblici.

Per la porzione di bacino che comprende l'asta principale del Bisagno ed i suoi bacini tributari di sponda sinistra dalla Foce a Prato, le porzioni medio valliva e montana del bacino del T. Bisagno, il bacino del T. Lentro le stazioni pluviometriche sono state scelte in base al numero di dati a disposizione (almeno venti anni di registrazione) e rientrano quasi tutte nel bacino idrografico del Bisagno.

I dati utilizzati sono le altezze di pioggia, espresse in millimetri (mm), delle precipitazioni di massima intensità, registrate ai pluviografi delle stazioni di Genova Università, Genova Servizio Idrografico, Ponte Carrega, S. Eusebio, Prato, Viganego Scoffera, per le durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore per ogni anno di osservazione.

Per la porzione di bacino che comprende gli affluenti di destra del T. Bisagno dal rio Veilino al rio Ruinà, dopo un 'analisi specifica, sono state scelte quali stazioni maggiormente rappresentative per posizione topografica ed altimetrica quelle di Prato, Ponte Carrega, Genova Castellaccio e Molassana.

Per le elaborazioni statistico-probabilistiche si è fatto riferimento alle precipitazioni di massima intensità registrate ai pluviografi per le durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore e per le durate minori di un'ora con intervalli ogni 5 minuti."

2.2 Determinazione delle piogge intense per l'asta principale e gli affluenti in sponda sinistra

Come riportato nel Piano di bacino stralcio del torrente Bisagno, *"Le Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica per un qualunque sito interno al bacino del torrente Bisagno potranno essere valutate tramite la formulazione:*

$$h_R(t) = \frac{a_1^2}{\sqrt{a_2}} \exp\left[\sqrt{\ln\left(\frac{a_2}{a_1^2}\cdot T^{2(\varphi_2-1)n}\right)}\,\Phi^{-1}(1-1/R)\right] T^{(2-\varphi_2)n}$$

i cui parametri, per i punti coincidenti con le stazioni di misura, sono riportati in Tabella 2.3. Per un qualunque punto del bacino, potranno invece essere utilizzate le carte in scala 1:25.000 (…)

Tabella 2.3 - Parametri delle Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica nelle stazioni pluviometriche esaminate (per altezza di pioggia in mm e durata in ore)."

Stazione	Comune	Lat.	Lon.	a_1	n	a_2	φ_2
a) Genova Univ.	Genova	44°25'	3°32'W	49.175	0.331	2944.692	1.002
b) Genova S.I.	Genova	44°24'	3°31'W	46.404	0.335	2554.164	0.995
c) Ponte Carrega	Genova	44°26'	3°29'W	46.279	0.361	2586.449	1.017
d) S.Eusebio	Genova	44°27'	3°28'W	34.678	0.373	1358.966	0.986
e) Prato	Genova	44°27'	3°26'W	46.702	0.362	2371.946	0.991
f) Viganego	Bargagli	44°26'	3°23'W	42.178	0.397	2088.563	0.951
g) Scoffera	Torriglia	44°29'	3°20'W	42.209	0.391	1951.102	0.987

Le stazioni pluviometriche sopra riportate sono localizzate in Figura 2-1.

Le LSPP per le medesime stazioni sono rappresentate nelle immagini che seguono.

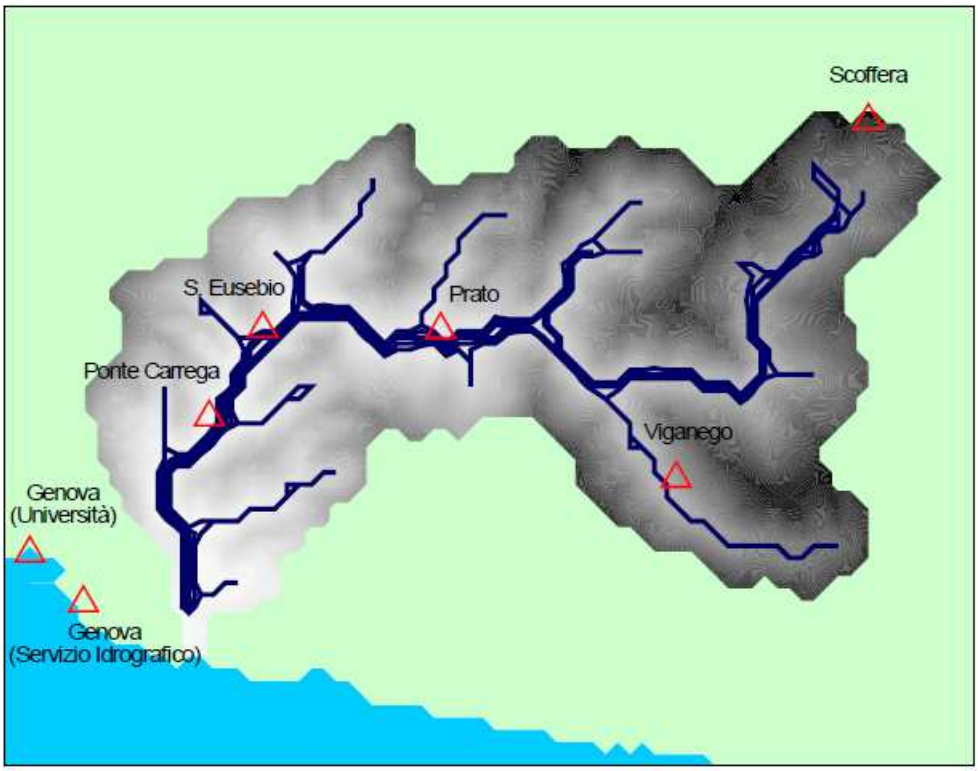


Figura 2-1 - Stazioni pluviometriche relative al bacino del torrente Bisagno con almeno venti anni di registrazione.

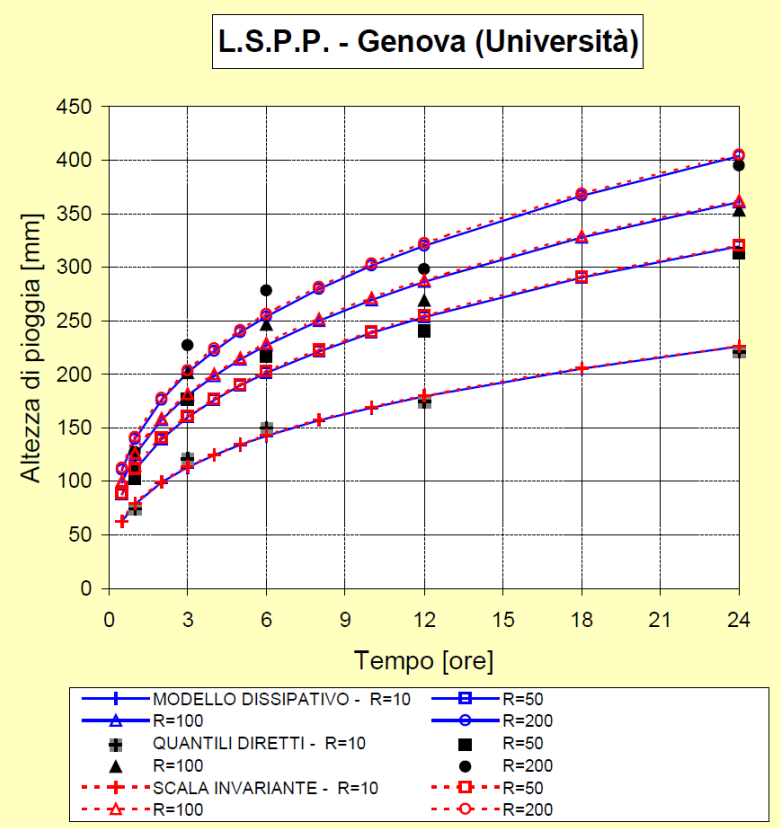


Figura 2-2 - LSPP – stazione di Genova (Università).

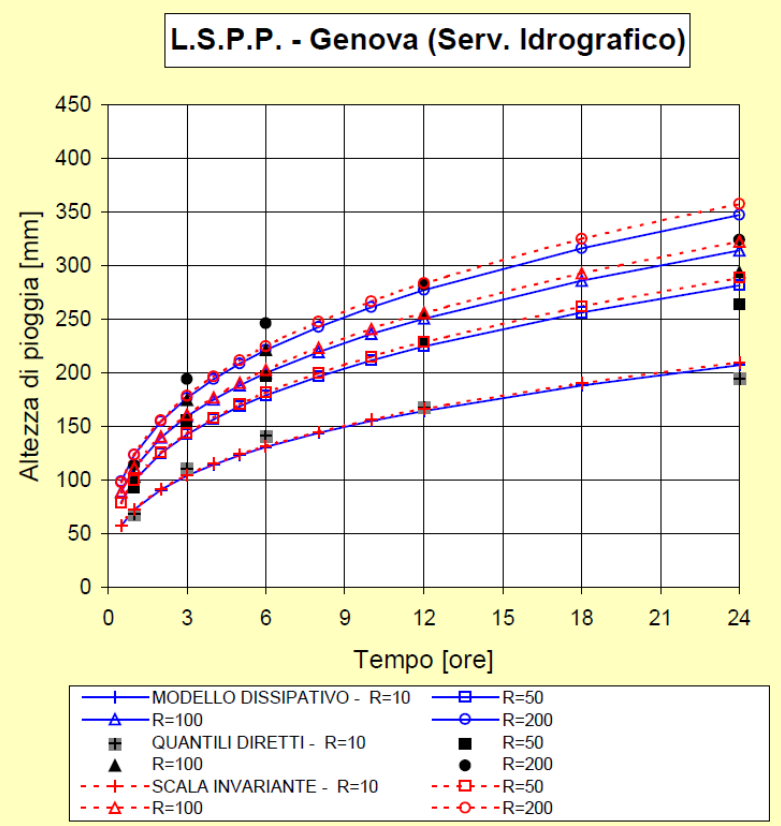


Figura 2-3 - LSPP – stazione di Genova (Servizio Idrografico).

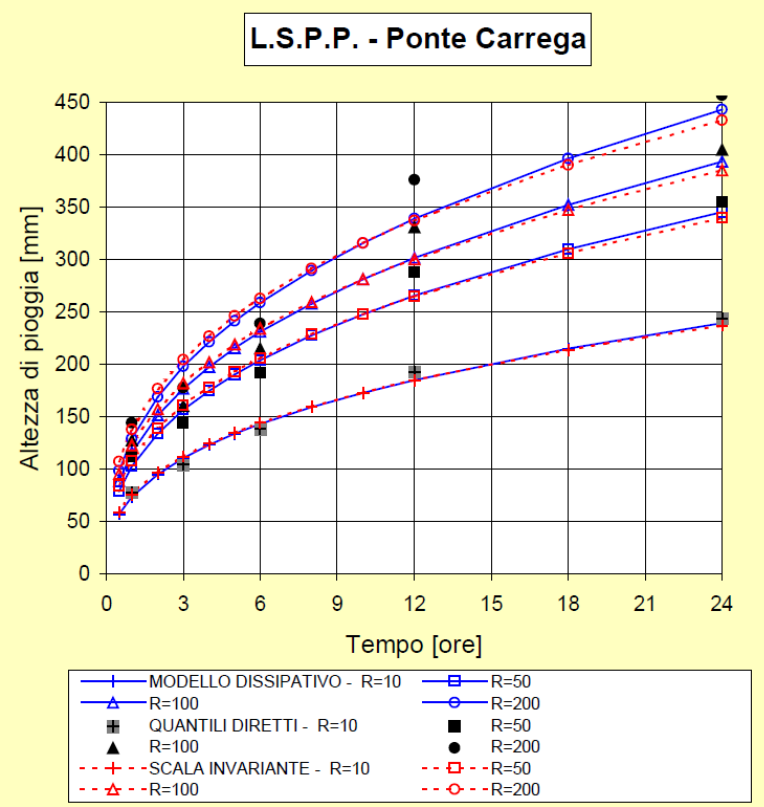


Figura 2-4 - LSPP – stazioni Genova (serv. idrografico) e di Ponte Carrega.

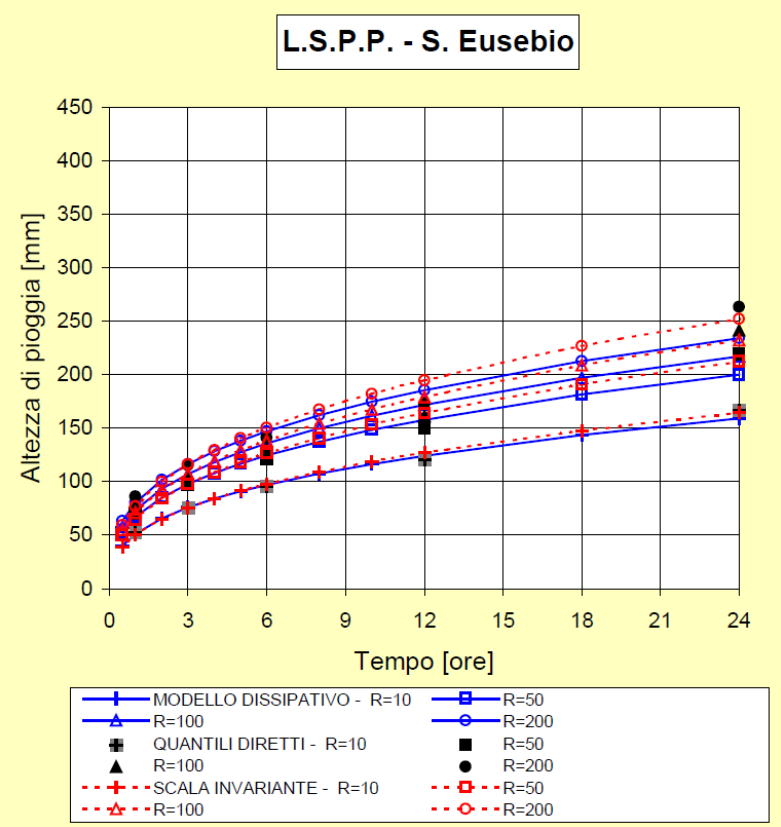


Figura 2-5 - LSPP – stazione di S. Eusebio.

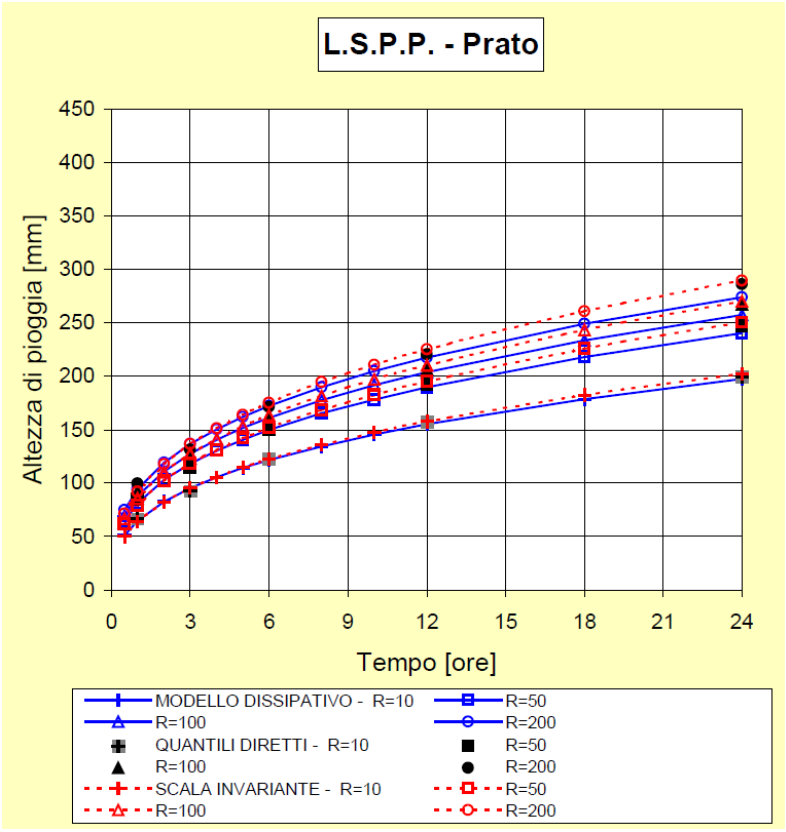


Figura 2-6 - LSPP – stazioni di S. Eusebio e Prato.

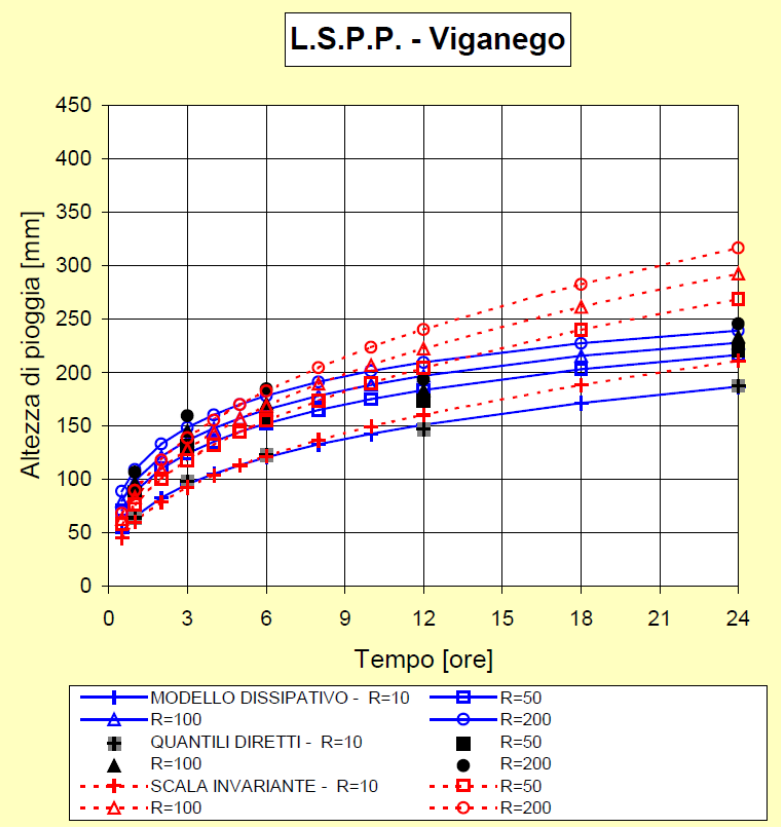


Figura 2-7 - LSPP – stazione di Viganego.

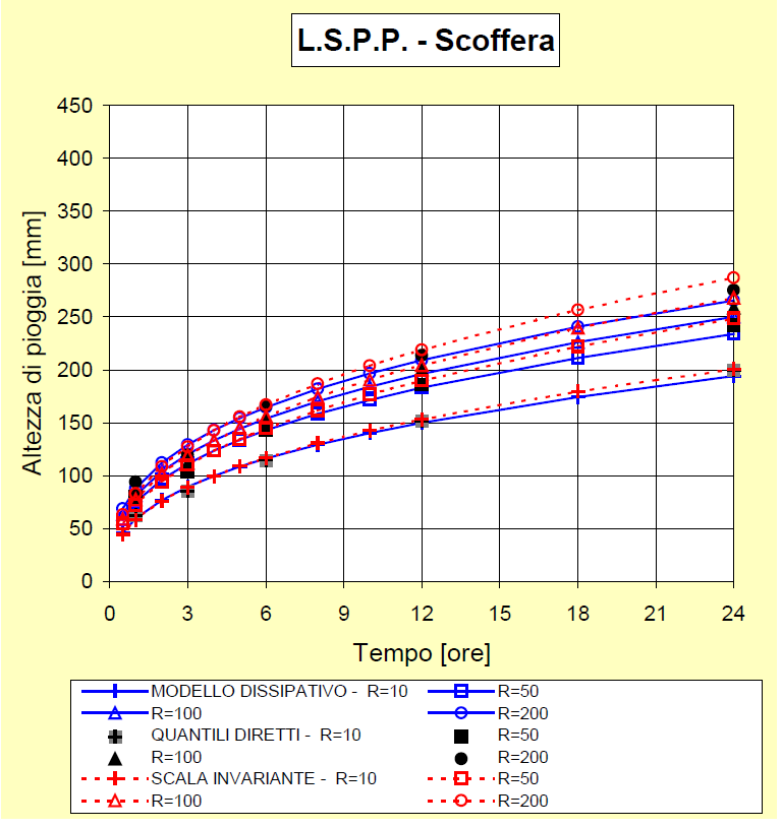


Figura 2-8 - LSPP – stazioni di Viganego e Scoffera.

Nel complesso, la distribuzione dei parametri a_1 e n utilizzati per il calcolo delle LSPP è riportata nelle figure che seguono.

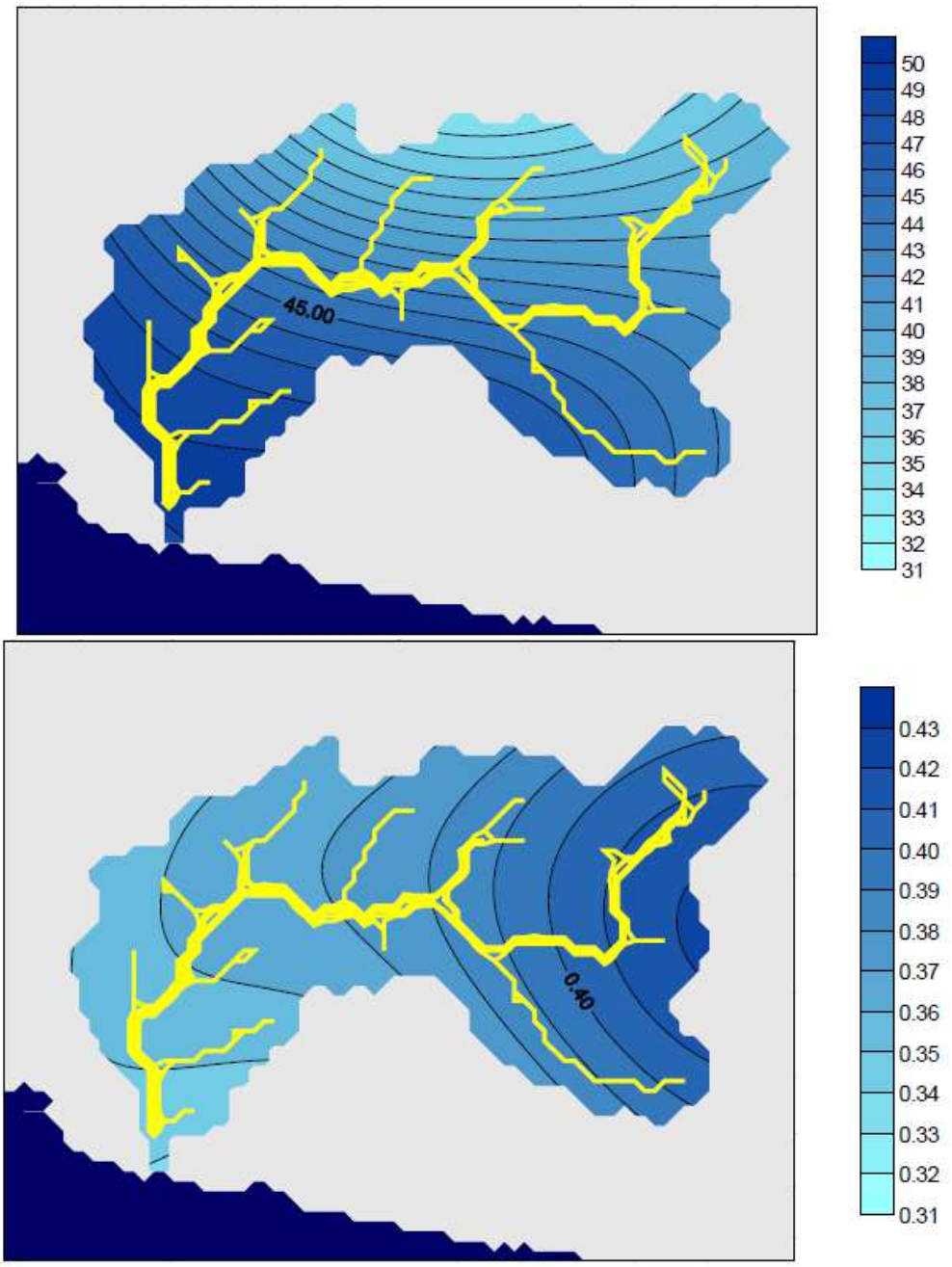


Figura 2-9 – Distribuzione dei parametri a_1 (sopra) e n (sotto) utilizzati per il calcolo delle LSPP.

2.3 Determinazione delle piogge intense per gli affluenti in sponda destra dal Veilino al Ruinà

Come riportato nel Piano di Bacino, sono stati preliminarmente acquisiti i valori di pioggia registrati dalle stazioni pluviometriche e riportati sugli *Annali Idrologici del Servizio Idrografico del Genio Civile.*

La rete pluviometrica di riferimento è rappresentata in Figura 2-10. I dati caratteristici dei pluviometri e le serie storiche di dati disponibili sono riassunti nella tabella seguente.

Denominazione	Tipo	Q. sul mare	H dal suolo	Inizio oss.	Denominazione	t > 1 h
- Prato	*Pr*	*89.0 m*	*2.0 m*	*1957*	- Prato	*1957-1981*
- Ponte Carrega	*Pr*	*26.0 m*	*2.1 m*	*1933*	- Ponte Carrega	*1954-1991*
- Genova Castellaccio	*Pr*	*379.0 m*	*23.0 m*	*1914*	- Genova Castellaccio	*1939-1971*
- Molassana	*P*	*131.0 m*	*1.5 m*	*1907*	- Molassana	*1971-1975*

Tabella 1 – Caratteristiche dei pluviometri di riferimento e delle serie storiche di dati disponibili.

Tra le stazioni riportate, "*i dati del pluviografo di Molassana non sono stati presi in considerazione a causa del limitato intervallo di tempo disponibile su cui svolgere analisi di tipo statistico (4 anni).*"

Le stazioni pluviometriche scelte sono state invece quelle "*maggiormente rappresentative l'area in esame per posizione topografica e altimetrica. Inoltre si è tenuto conto della disponibilità di dati su intervalli cronologici circa omogenei per le varie stazioni di misura.*"

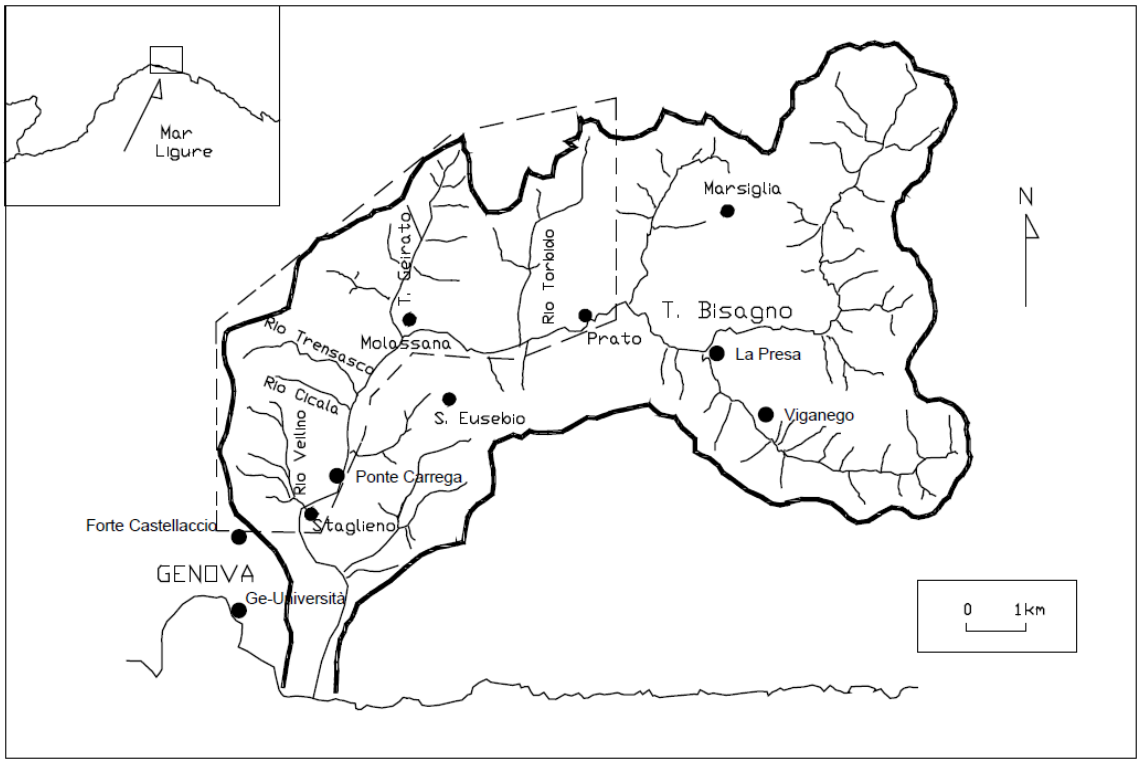


Figura 2-10 – Rete pluviometrica di riferimento per la determinazione delle piogge intense.

Nel complesso, la stazione pluviometrica di Ponte Carrega è stata scelta per l'analisi dei bacini che vanno dal rio Veilino al rio Prou, mentre per l'analisi dei bacini che vanno dal rio dei Consiglieri al rio Ruinà sono stati scelti i dati derivanti dalla stazione pluviometrica di Prato, poiché il crinale che delimita il bacino del torrente Geirato e quello del rio Torbido determina un comportamento particolarmente distinto tra le due aree antecedenti e conseguenti il crinale stesso.

"Parallelamente a ciò è stata realizzata un'analisi mediante il metodo dei topoieti sull'area oggetto di studio che è risultata comunque meno cautelativa di quella poi effettivamente utilizzata.

Le serie storiche di cui sopra sono state quindi regolarizzate con una metodologia statistica (curva di Gumbel) e quindi utilizzate per la determinazione delle curve di possibilità climatica per assegnati tempi di ritorno. (…)

Sotto l'ipotesi che l'altezza di pioggia massima annuale h con periodo di ritorno T, per la durata d, sia esprimibile attraverso la legge di Gumbel, risulta:

$$h(T,d) = u(d) - \alpha(d) \cdot \ln\left\{\ln\left[\frac{T}{T-1}\right]\right\}$$

con u(d) e α (d) rispettivamente parametri di localizzazione e di scala per la durata d.

Le ulteriori ipotesi che siano:

- $\frac{\alpha(d)}{u(d)} = \frac{\alpha(d_0)}{u(d_0)} = k$

- $u(d) = c \cdot d^n$

portano alla scrittura dell'altezza di pioggia nella forma:

$$h(T,d) = a(T) \cdot d^n$$

con $a(T) = c \cdot \left\{1 - k \cdot \ln\left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right]\right\}$.

Tali relazioni vengono valutate utilizzando i dati storici pluviometrici disponibili.

Per determinare le costanti c ed n si calcolano il coefficiente angolare e l'intercetta della retta che interpola le 5 coppie di valori ln(d), ln(h) che si ottengono al variare della durata d.

Sono stati presi in esame i seguenti periodi di ritorno: 50, 100, 200, 500 anni e per ognuno di essi è stata ricavata la curva di possibilità climatica riferita alla stazione pluviometrica analizzata. (…)"

Note tali curve, è risultato *necessario valutare le curve in grado di fornire il valore di pioggia "efficace"*, ovvero la *porzione di pioggia che darà luogo a deflusso superficiale, dedotta quindi la parte che darà luogo a fenomeni di evaporazione, infiltrazione, ritenzione di superficie, intercettazione e percolazione nelle falde acquifere.*

Tale determinazione è stata effettuata attraverso l'applicazione delle formule del metodo del Soil Conservation Service (SCS).

Le curve di possibilità pluviometrica riscalate per le due stazioni di riferimento sono rappresentate nelle figure e nelle tabelle che seguono.

Stazione di Prato
Curve di possibilità climatica riscalata

T (anni)	50	100	200	500
d (min)	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	23,3	26,5	29,8	34,2
20	33,8	38,2	42,6	48,4
30	41,6	46,8	52,0	58,9
40	48,0	53,8	59,6	67,3
50	53,5	59,8	66,2	74,6
60	58,3	65,1	72,0	81,0
70	62,7	70,0	77,2	86,8
80	66,6	74,4	82,0	92,1
90	70,5	78,4	86,4	97,0
100	74,0	82,3	90,6	101,6
110	77,2	85,8	94,4	105,9
120	80,3	89,2	98,1	109,9
130	83,3	92,4	101,6	113,8
140	86,1	95,5	104,9	117,4
150	88,8	98,4	108,1	121,0
160	91,3	101,3	111,2	124,3
170	93,8	104,0	114,1	127,6
180	96,2	106,6	117,0	130,7
190	98,5	109,1	119,7	133,7
200	100,7	111,5	122,3	136,6
210	102,9	113,9	124,9	139,4
220	105,0	116,2	127,4	142,2
230	107,0	118,4	129,8	144,9
240	109,0	120,6	132,2	147,5
250	111,0	122,7	134,5	150,0
260	112,9	124,8	136,7	152,4
270	114,7	126,8	138,9	154,9
280	116,5	128,8	141,0	157,2
290	118,3	130,7	143,1	159,5
300	120,0	132,6	145,1	161,8
310	121,7	134,4	147,1	164,0
320	123,3	136,2	149,1	166,1
330	125,0	138,0	151,0	168,2
340	126,6	139,7	152,9	170,3
350	128,1	141,4	154,7	172,3
360	129,7	143,1	156,6	174,3

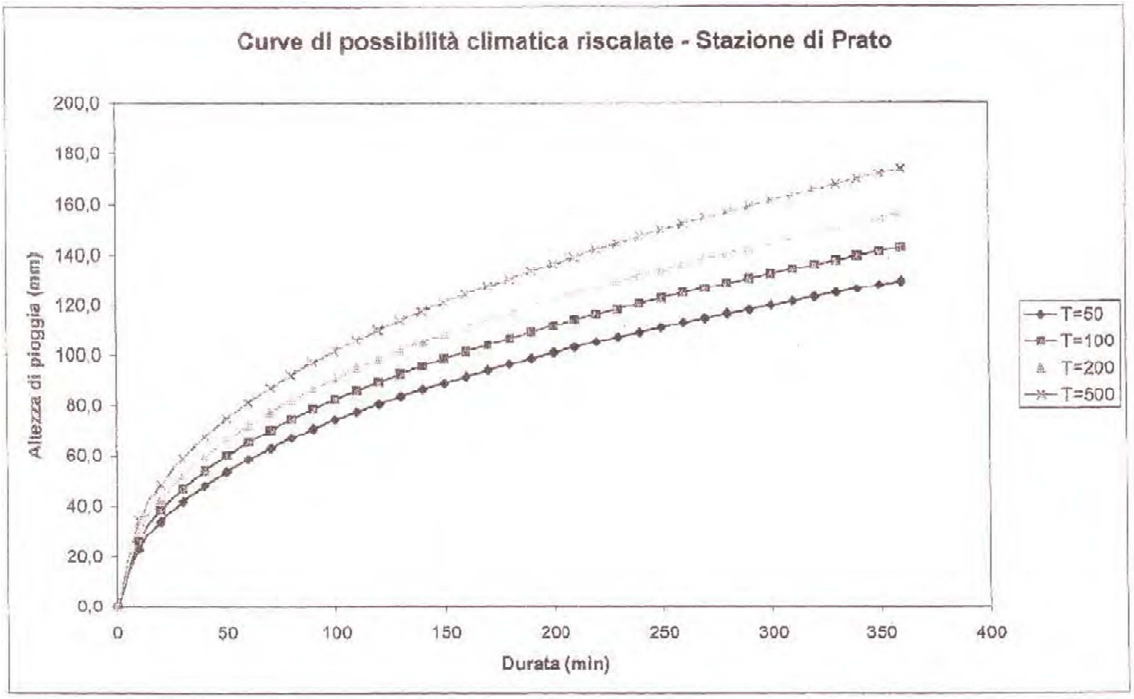
CN	S	I
91,61	23,26	4,65

Stazione di Ponte Carrega
Curve di possibilità climatica riscalata

T (anni)	50	100	200	500
d (min)	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	38,3	44,4	50,5	58,7
20	53,1	61,1	69,1	79,7
30	63,8	73,1	82,5	94,8
40	72,5	82,9	93,3	107,0
50	79,9	91,2	102,5	117,4
60	86,4	98,5	110,6	126,6
70	92,3	105,1	117,9	134,8
80	97,7	111,1	124,6	142,3
90	102,6	116,7	130,7	149,3
100	107,3	121,9	136,5	155,8
110	111,6	126,7	141,9	161,8
120	115,7	131,3	146,9	167,6
130	119,6	135,7	151,8	173,0
140	123,3	139,9	156,4	178,2
150	126,8	143,8	160,8	183,2
160	130,2	147,6	165,0	187,9
170	133,5	151,3	169,0	192,5
180	136,7	154,8	172,9	196,9
190	139,7	158,2	176,7	201,1
200	142,6	161,5	180,3	205,2
210	145,5	164,7	183,9	209,2
220	148,3	167,8	187,3	213,0
230	150,9	170,8	190,6	216,8
240	153,5	173,7	193,8	220,4
250	156,1	176,6	197,0	224,0
260	158,6	179,3	200,1	227,4
270	161,0	182,0	203,1	230,8
280	163,4	184,7	206,0	234,1
290	165,7	187,3	208,8	237,3
300	167,9	189,8	211,6	240,5
310	170,1	192,3	214,4	243,6
320	172,3	194,7	217,1	246,6
330	174,4	197,1	219,7	249,5
340	176,5	199,4	222,3	252,4
350	178,6	201,7	224,8	255,3
360	180,6	204,0	227,3	258,1

CN	S	I
93,49	17,69	3,54

Tabella 2 - Curve di possibilità climatica riscalate per le stazioni di Prato (sx) e Ponte Carrega (dx).



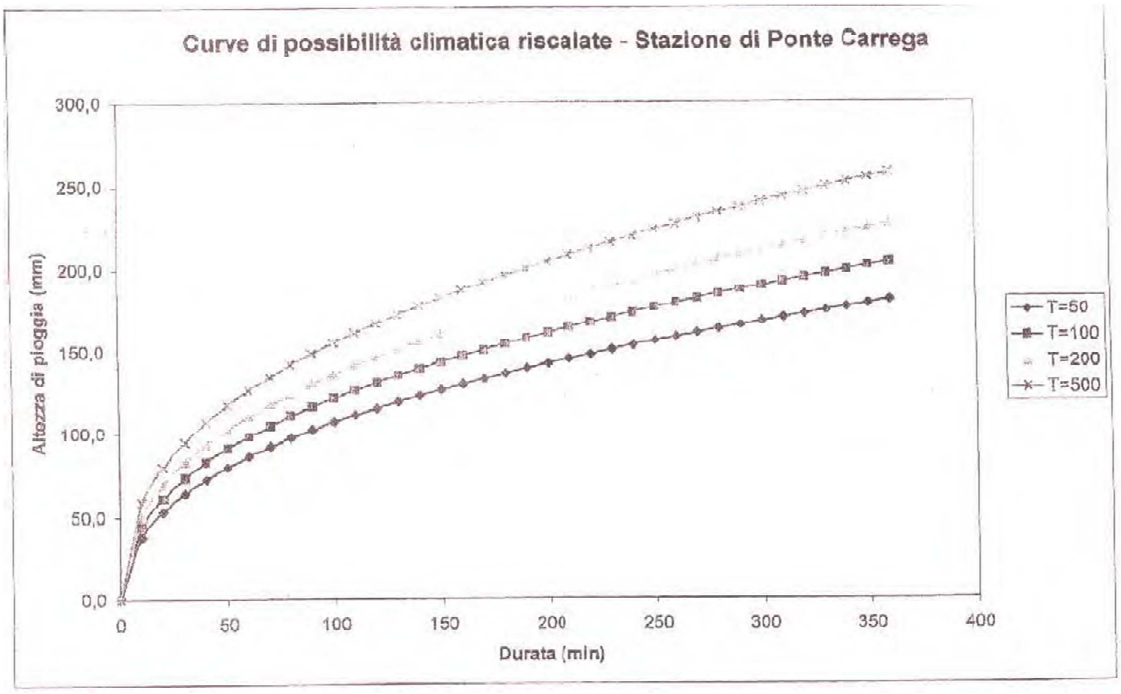


Figura 2-11 – Curve di possibilità pluviometrica per le due stazioni di riferimento.

3 PORTATE DI RIFERIMENTO

3.1 Metodologia di analisi

Come descritto nel Piano di bacino, "*l'individuazione delle criticità idrauliche dei vari corsi d'acqua del bacino, delle aree conseguentemente inondabili a vari tempi di ritorno e la definizione degli interventi di sistemazione idraulica si basano sulla determinazione delle portate di piena massima annuale a diversi tempi di ritorno.*

Tale determinazione è stata affrontata in maniera diversa negli studi propedeutici per le due diverse porzioni di bacino, essenzialmente perché la valutazione dell'importanza che l'asta terminale del T. Bisagno e di conseguenza le sue note e gravi criticità rivestono sul tessuto urbano dell'area genovese ha suggerito di utilizzare per la porzione di bacino che comprende l'asta principale una metodologia più affinata ed aggiornata di valutazione della portata. (…)

Per la porzione principale di bacino è stata proposta una nuova procedura di valutazione della portata di massima piena, anche in considerazione delle notevoli divergenze riscontrabili nelle varie stime di portata massima condotte nel corso del tempo.

La procedura adottata si basa sull'integrazione tra l'informazione idrometrica regionale e l'analisi idrologica di dettaglio dell'assetto del bacino; quest'ultima si giova di una descrizione distribuita della variabilità spaziale delle caratteristiche statistiche delle piogge intense, del tipo idrologico dei suoli e dell'uso del suolo stesso.

In base a tale impostazione, è stato innanzitutto utilizzato il metodo della regionalizzazione statistica, che ha condotto alla determinazione della curva di crescita regionale, curva che fornendo il valore della portata adimensionalizzata rispetto ad una portata «indice» in funzione del tempo di ritorno è in grado di descrivere le caratteristiche di variabilità delle massime piene.

La massima piena Q_T temibile lungo il corso del torrente Bisagno può essere quindi valutata tramite la relazione

$$Q_T = Q_{indice} \cdot \left[0{,}619 - \frac{0{,}369}{0{,}319} \cdot (1 - e^{0{,}319 \cdot y}) \right]$$

dove y rappresenta la variabile ridotta di Gumbel, funzione del periodo di ritorno T, in anni, pari a:

$$y = y_T = -\ln\left\{ \ln\left[\frac{T}{T-1} \right] \right\}$$

mentre Q_{indice} indica la media dei massimi annuali di portata al colmo.

La valutazione della portata indice Q_{indice} viene messa in relazione al regime delle piogge intense già determinato e delle caratteristiche del bacino idrografico sotteso dal sito di interesse." I due diversi metodi utilizzabili per la determinazione di tale portata indice sono l'applicazione per via diretta e per via indiretta del metodo geomorfoclimatico.

"Il confronto tra questi due metodi ha indicato una sostanziale concordanza di risultati, ma è stato infine privilegiato il metodo geomorfoclimatico indiretto, sia perché le stime risultano più cautelative sia perché tale procedimento che utilizza le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica risulta più semplice e robusto. (…)

È opportuno sottolineare come la stima dei valori 500-ennali, cui corrisponde una probabilità annua di non superamento (probabilità cumulata F) del 998 per mille, sia soggetta ad incertezze di stima assai elevate:

tali incertezze sono dovute, in generale, alla composizione tra l'incertezza di stima del quantile F-esimo della curva di crescita regionale e l'incertezza di stima della portata indice.

L'incertezza complessiva aumenta notevolmente quando si voglia addivenire a stime di portata al colmo relative a elevati valori di tempo di ritorno e quindi di F (ad es. per T= 500 anni, F=0.998).

L'interpretazione e l'impiego di questi risultati vanno perciò condotti con la massima cautela.

Per la porzione di bacino compresa tra gli affluenti in sponda destra del Bisagno dal Veilino al Ruinà si è applicato il metodo razionale, utilizzando il metodo del CN per la determinazione delle piogge nette per la trasformazione in deflusso ed il tempo di corrivazione calcolato con la formula di Giandotti."

3.2 Caratteristiche dei bacini idrografici

"Il bacino [complessivo, alla foce] *del torrente Bisagno ha una superficie di 90,6 Kmq e la sua asta fluviale ha una lunghezza di 26,5 Km.*

Detto bacino si sviluppa sul territorio a partire dalla quota massima di 1034 m s.l.m. in corrispondenza della vetta di M. Candelozzo fino a raggiungere il livello del mare in corrispondenza della foce.

Nel settore più occidentale, lungo i crinali dei forti, le quote medie dei crinali tendono a diminuire, portandosi progressivamente ad altezze comprese tra i 400 ed i 600 m s.l.m. A levante, in corrispondenza dello spartiacque Bisagno-Lavagna, si raggiungono quote medie superiori a 900 m s.l.m., come le cime di M. Croce di Fo (973 m s.l.m.) e di M. Bado (912 m s.l.m.).

Nella parte alta del bacino del T. Bisagno le valli sono incise prevalentemente in direzione NNE-SSO, mentre le incisioni vallive legate al T. Lentro, al R. Trensasco ed al R. Cicala sono orientate prevalentemente in direzione ONO-ESE. L'attuale complessa situazione di orientamento dei versanti è dovuta in larga parte alla tettonica recente (Plio-Quaternaria), che ha influenzato in maniera consistente sia l'andamento dei deflussi sia, a partire da Prato fino alla foce del torrente, la geometria delle alluvioni stesse, sede delle principali falde acquifere[1]."

Il reticolo idrografico principale caratterizzante il bacino del torrente Bisagno è schematizzato in Figura 3-1, estratta dal Piano di Bacino, nella quale sono rappresentati i nodi idrologici di riferimento considerati nel Piano stesso.

[1] Fonte: Regione Liguria, "Piano di Tutela delle Acque – Relazioni monografiche dei corpi idrici", http://www.ambienteinliguria.it.

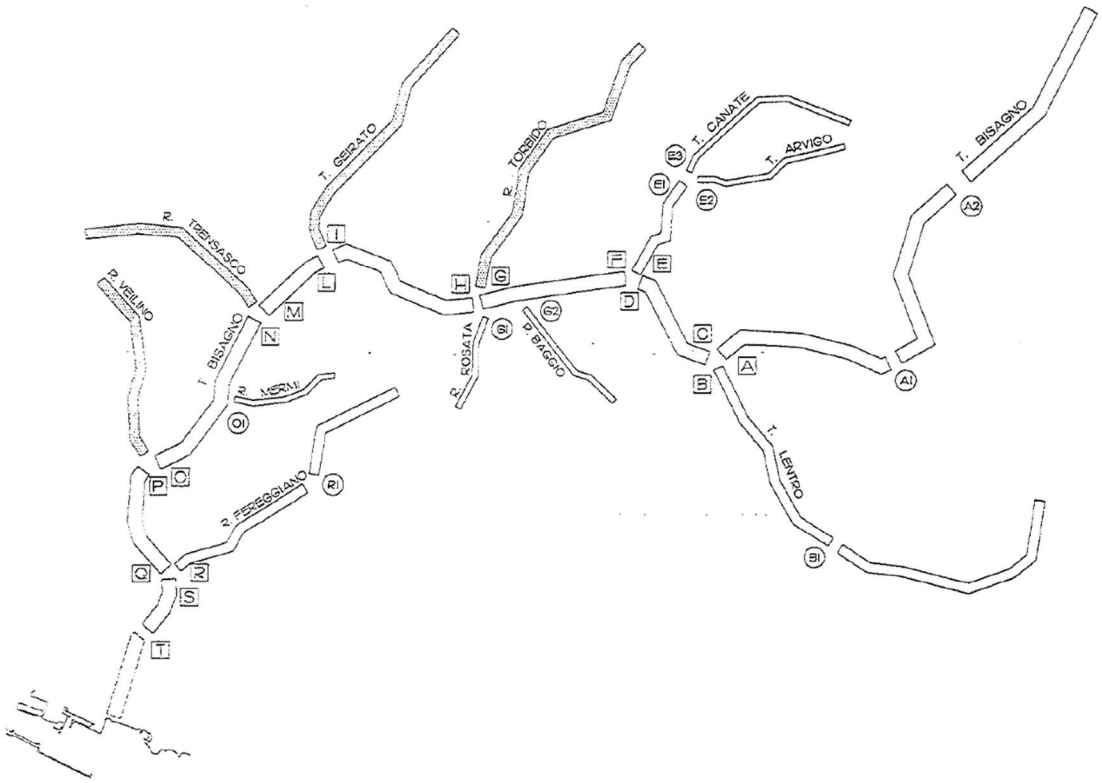


Figura 3-1 – Reticolo idrografico principale del bacino del torrente Bisagno (fonte: Piano di bacino stralcio del torrente Bisagno).

Nel seguito si riassumono le caratteristiche principali dei bacini idrografici sottesi dal torrente Bisagno stesso nel tratto di interesse (cfr. Tabella 3) nonché dai principali affluenti che vi confluiscono (Tabella 4). I nodi indicati nelle tabelle sono quelli rappresentati in Figura 3-1. In tabella sono anche descritte le caratteristiche di due sezioni di riferimento a valle del tratto di interesse, ovvero la sezione Q (torrente Bisagno a monte Ferregiano) e la sezione T (torrente Bisagno a monte dell'imbocco del tratto tombato).

Corso d'acqua	T.Bisagno	T.Bisagno	T.Bisagno	T.Bisagno	T.Bisagno	T.Bisagno	T.Bisagno
Sezione	monte t. Lentro	valle t. Lentro	valle t. Canate	valle rio Torbido	valle t. Geirato	monte t. Ferregiano	monte tratto tombato
Nodo	A	D	G	I	M	Q	T
S [km²]	22,9	37,0	51,4	60,9	70,4	84,7	92,7
Quota media [m s.m.]	575	561	506,5	489	463	420	397
Quota massima [m s.m.]	1.033,5	1.033,5	1.033,5	1.033,5	1.033,5	1.033,5	1.033,5
Pendenza media dei versanti [%]	32	34	35	34	33	32	31
Lunghezza asta principale [km]	11,2	13,2	15,9	18,4	19,5	24,0	25
Pendenza media asta principale [%]	6,6	5,9	5,1	4,6	4,4	3,7	3,5
t_c (ore)	1,82	2,07	*2,45(*)*	2,77	2,97	3,56	3,74

(*): valore interpolato

Tabella 3 – Caratteristiche dei bacini idrografici principali sottesi dal T. Bisagno nel tratto di interesse.

Corso d'acqua	T.Lentro	T.Canate	Rio Torbido	T.Geirato
Nodo	B	E	Sez.46[2]	Sez.28[2]
S [km²]	11,6	8,8	6,0	7,6
Quota media [m s.m.]	578	507,4	340	194
Quota massima [m s.m.]	975	960	990	800
Pendenza media dei versanti [%]	38	42	n.d.	n.d.
Lunghezza asta principale [km]	7,5	5,4	4,8	4,3
Pendenza media asta principale [%]	8,4	13,2	n.d.	n.d.
t_c (ore)	1,37	n.d.	1,15	1,57

Tabella 4 – Caratteristiche dei bacini idrografici sottesi dai principali affluenti nell'area di interesse.

L'ubicazione delle sezioni di riferimento sul rio Torbido e sul torrente Geirato è rappresentata in Figura 3-2 e in Figura 3-3.



Figura 3-2 - Reticolo idrografico del bacino del rio Torbido (fonte: Piano di bacino stralcio del torrente Bisagno).

[2] Nel Piano di bacino stralcio, per il rio Torbido e il torrente Geirato le caratteristiche dei bacini sono fornite in diverse sezioni lungo l'asta principale e gli affluenti; i dati riportati in tabella si riferiscono alle sezioni di confluenza nel torrente Bisagno.

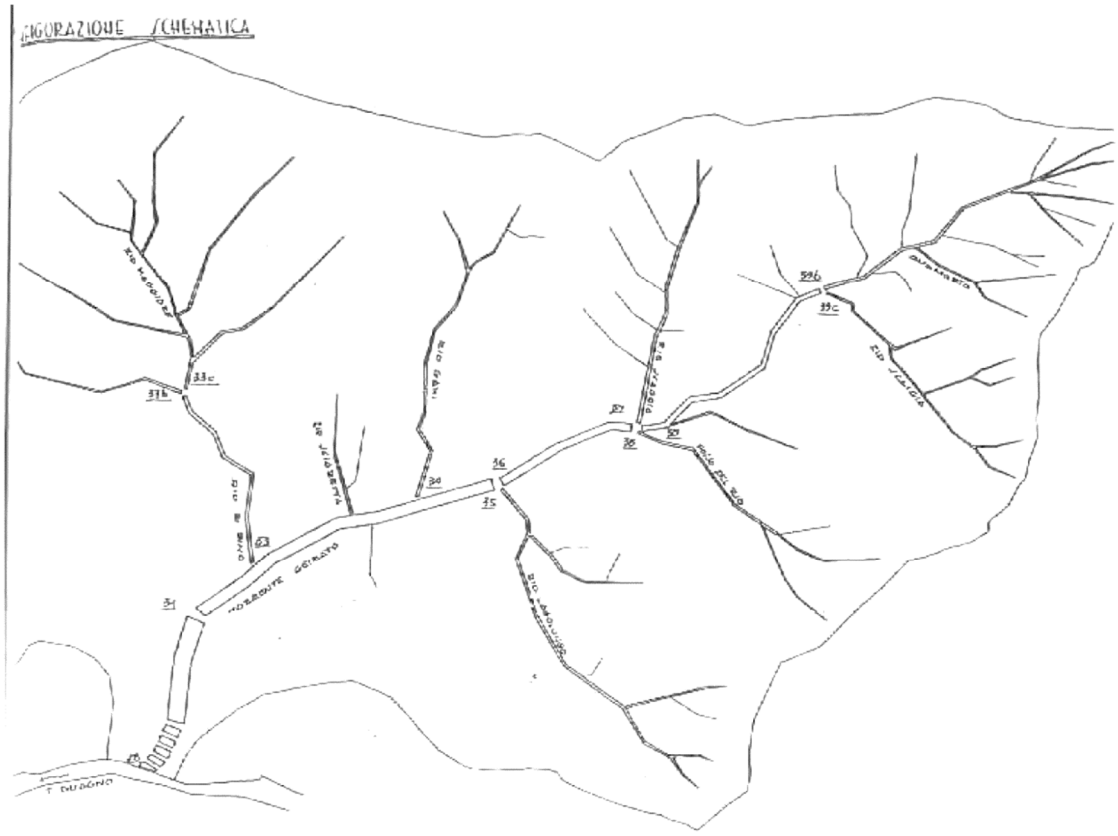


Figura 3-3 – Reticolo idrografico del bacino del torrente Geirato (fonte: Piano di bacino stralcio del torrente Bisagno).

3.3 Regime idrologico ordinario

L'andamento idrologico di regime ordinario del torrente Bisagno è caratterizzato da una progressiva riduzione delle portate defluenti tra i mesi invernali e quelli estivi. Il periodo di minore disponibilità idrica si verifica generalmente nei mesi giugno-settembre, poi i deflussi in alveo si incrementano sino a raggiungere valori invernali pari anche a 4-5 volte quelli estivi.

Nel seguito si riporta a titolo esemplificativo l'andamento medio mensile delle portate defluenti nel torrente Bisagno alla foce, estratto da quanto riportato nel Piano di Tutela delle Acque[3]. La superficie del bacino sotteso dalla sezione di riferimento è pari a 92,91 km^2; la portata media annua è pari a 3.232 l/s.

[3] http://geoportale.regione.liguria.it

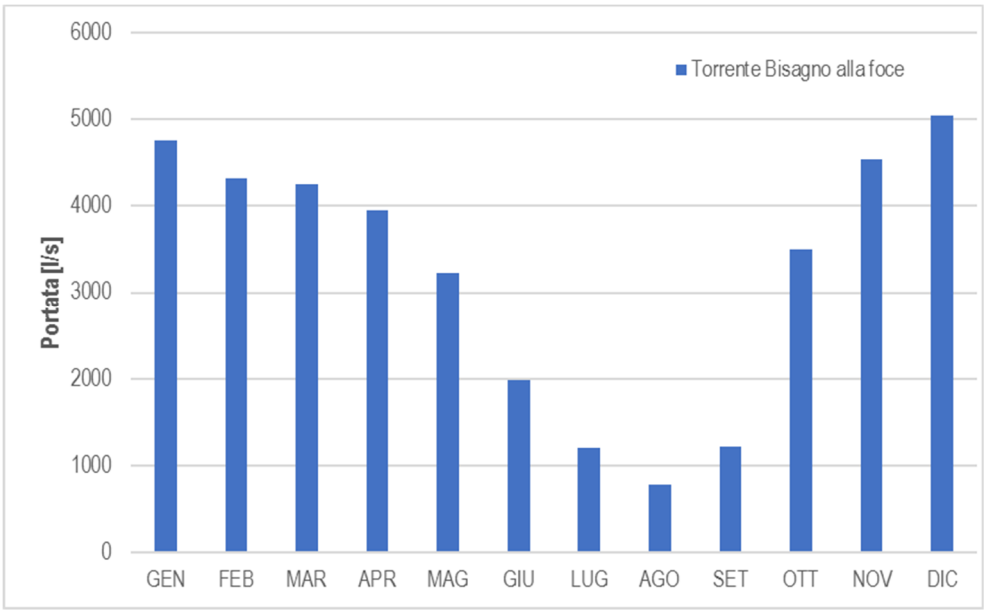


Figura 3-4 – Portate medie mensili del torrente Bisagno alla foce (grafico realizzato in funzione dei dati riportati nel Piano di Tutela delle Acque).

Come riportato nel Piano di Tutela delle Acque[1], inoltre, il profilo longitudinale del T. Bisagno e dei suoi affluenti "*non sembra aver raggiunto l'equilibrio ma pare essere ancora in fase evolutiva; si assiste infatti nella parte alta del bacino ad un'intensa erosione al piede dei versanti, che è oltretutto causa di instabilità, e nella parte bassa del bacino, là dove si apre la vera e propria piana alluvionale, ad una incisione delle abbondanti alluvioni, alternata, durante le piene eccezionali, a periodi di "sovralluvionamento" degli alvei.*

Anche per questo il corpo alluvionale, formato da ghiaie e ciottoli oltre che da una parte fine, composta prevalentemente da limi ed argille, risulta esteso per la presenza nelle valli di grande quantità di detriti, anche provenienti da numerose frane e paleofrane.

In tutto il territorio del T. Bisagno i processi erosivi di versante dovuti alle acque dilavanti ed ai corsi d'acqua sono piuttosto intensi; è opportuno ricordare come essi siano dovuti a più fattori, quali la natura del materiale litoide, i fattori morfologici, i fattori climatici, il tipo di copertura vegetale e non da ultimi i fattori antropici legati prevalentemente alla regimazione antropica nella parte bassa del torrente stesso."

3.4 Portate di piena di riferimento

Le portate di piena per diversi tempi di ritorno del torrente Bisagno e dei suoi affluenti sono state estratte da quanto definito nel Piano di Bacino stralcio del torrente Bisagno. In Tabella 5 e Tabella 6 sono riassunte le portate di piena relative alle sezioni di interesse sul torrente Bisagno e ai principali affluenti. I nodi indicati sono quelli rappresentati in Figura 3-1.

Sezione asta principale	Nodo	Q_{10} [m³/s]	Q_{25} [m³/s]	Q_{50} [m³/s]	Q_{100} [m³/s]	Q_{200} [m³/s]	Q_{500} [m³/s]
T. Bisagno monte t. Lentro	A	130	190	247	318	406	558
T. Bisagno valle t. Lentro	D	183	266	346	446	570	783
T. Bisagno valle t. Canate	G	250	365	475	612	782	1.073
T. Bisagno valle rio Torbido	I	295	430	559	721	921	1.264
T. Bisagno valle t. Geirato	M	336	489	637	821	1.049	1.440
T. Bisagno monte t. Ferregiano	Q	388	566	737	949	1.213	1.664
T. Bisagno monte tratto tombato	T	416	607	790	1.018	1.301	1.785

Tabella 5 – Portate di piena per il torrente Bisagno al variare del tempo di ritorno.

Affluente	Nodo	Q_{10} [m³/s]	Q_{25} [m³/s]	Q_{50} [m³/s]	Q_{100} [m³/s]	Q_{200} [m³/s]	Q_{500} [m³/s]
T. Lentro	B	56	82	107	138	176	242
T. Canate	E	64	93	121	156	200	274
rio Torbido	Sez.46[2]	n.d.	n.d.	87	112	143	196
T. Geirato	Sez.28[2]	n.d.	n.d.	107	138	176	241

Tabella 6 – Portate di piena per i principali affluenti del torrente Bisagno al variare del tempo di ritorno.

Si evidenzia come la portata di piena dei vari affluenti sia generalmente confrontabile con l'incremento di portata tra le due sezioni successive poste sull'alveo principale del torrente Bisagno a cavallo della confluenza (a meno del torrente Geirato che mostra maggiori scostamenti). Tale aspetto indica come gli idrogrammi di piena di riferimento siano stati considerati quasi in fase tra loro.

La tabella seguente riporta a titolo di esempio tale confronto per la portata con tempo di ritorno duecentennale.

Affluente	Nodo	Q_{200} [m³/s]	Nodo asta principale monte	Q_{200} [m³/s]	Nodo asta principale valle	Q_{200} [m³/s]	ΔQ_{200} [m³/s]
T. Lentro	B	***176***	A	406	D	570	***164***
T. Canate	E	***200***	D	570	G	782	***212***
rio Torbido	Sez.46[2]	***143***	G	782	I	921	***139***
T. Geirato	Sez.28[2]	***176***	I	921	M	1.049	***128***

Tabella 7 – Confronto tra la portata di piena dei principali affluenti del t. Bisagno e il corrispondente incremento del colmo lungo l'asta principale.

In generale, la differenza di portata di piena del torrente Bisagno tra due sezioni poste a cavallo di un generico affluente risulta di poco inferiore al valore al colmo di riferimento per quest'ultimo (a parità di tempo di ritorno).

Fa eccezione il torrente Canate, verosimilmente in quanto la sezione G, sita sul torrente Bisagno a valle affluente, risente anche dei contributi dei rii Rosata e Baggio, affluenti in sinistra del Bisagno stesso, non introdotti nella presente analisi in ragione della ridotta superficie del bacino imbrifero sotteso (complessivamente inferiore a 3 km²).

Nel complesso, per l'intero bacino del torrente Bisagno la portata indice nonché le portate di piena al variare del tempo di ritorno sono rappresentate in Tabella 8. I nodi di riferimento sono evidenziati in Figura 3-5. Tutti i dati forniti sono stati estratti dal vigente Piano di Bacino stralcio del torrente Bisagno.

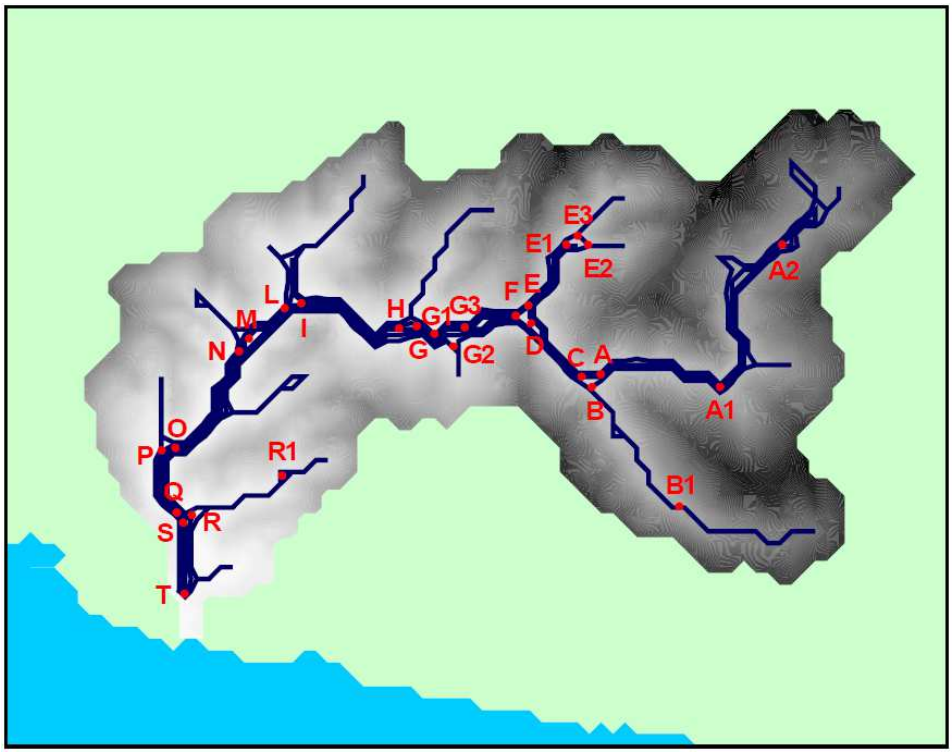


Figura 3-5 - Nodi principali della rete idrografica del torrente Bisagno alla foce (fonte: Piano di bacino stralcio).

Sezione	A‡	Q_{indice}	Tempo di ritorno, T, anni					
no.	Km^2	m^3/s	10	25	50	100	200	500
A	22.6	70.9	130	190	247	318	406	558
A1	15.5	57.4	105	153	200	257	329	451
A2	8.1	39.4	72	105	137	177	226	310
B	10.6	30.8	56	82	107	138	176	242
B1	6.5	20.6	38	55	72	92	118	162
C	33.4	96.5	177	258	336	432	552	758
D	35.7	99.6	183	266	346	446	570	783
E	9.3	34.9	64	93	121	156	200	274
E1	6.8	27.6	51	74	96	124	158	217
E2	2.4	10.4	19	28	36	47	59	82
E3	4.3	18.3	34	49	64	82	105	144
F	45.3	126.1	231	337	439	565	722	991
G	50.3	136.5	250	365	475	612	782	1073
G1	1.0	4.7	9	13	16	21	27	37
G2	1.9	8.9	16	24	31	40	51	70
G3	1	5.8	11	16	20	26	33	46
H	58.2	157.7	289	421	549	707	903	1240
I	61.0	160.8	295	430	559	721	921	1264
L	69.1	182.9	335	489	636	819	1047	1437
M	70.0	183.2	336	489	637	821	1049	1440
N	72.7	189.5	347	506	659	849	1085	1489
O	78.8	200.2	367	535	696	897	1147	1573
O1	2.0	9.6	18	23	33	43	55	
P	82.5	209.8	385	560	730	940	1201	1649
Q	84.0	211.8	388	566	737	949	1213	1664
R	5.1	24.3	44	65	84	109	139	191
R1	2.4	11.7	22	31	41	53	67	92
S	89.2	225.0	413	601	783	1008	1289	1768
T	92.1	227.1	416	607	790	1018	1301	1785

‡ sezione identificata per via automatica tramite modello topografico digitale.

Tabella 8 - Portata indice e portata al colmo per diversi tempi di ritorno.

Per quanto concerne gli affluenti in sponda destra dal rio Veilino al rio Ruinà, i corrispondenti valori calcolati in diverse sezioni sono descritti in Tabella 9.

Sezione	A	Q_{indice}	Tempo di ritorno, T, anni			
no.	Km^2	m^3/s	50	100	200	500
1	3.30	14.8	51	66	85	116
2	0.50	2.8	10	13	16	22
3	0.60	3.3	12	15	19	26
6	0.75	4.0	14	18	23	32
7	1.31	6.6	23	29	38	52
8	0.82	4.4	15	20	25	34
9	0.60	3.3	12	15	19	26
11	1.40	7.0	24	31	40	55
15	0.69	3.8	13	17	21	29
16	2.70	12.4	43	56	71	97
24	1.24	6.3	22	28	36	49
25	0.16	1.0	4	5	6	8
28	7.60	30.7	107	138	176	241
31	6.79	27.8	97	125	159	219
33	2.10	10.0	35	45	57	78
33B	0.37	2.2	8	10	12	17
33C	1.21	6.1	21	28	35	48
34	0.60	3.3	12	15	19	26
35	0.95	5.0	17	22	28	39
36	2.48	11.5	40	52	66	90
37	0.44	2.5	9	11	14	20
38	0.32	1.9	7	9	11	15
39	1.69	8.2	29	37	47	65
39B	1.20	6.1	21	27	35	48
39C	0.36	2.1	7	10	12	17
40	0.20	1.3	4	6	7	10
41	0.24	1.5	5	7	9	12
42	0.35	2.1	7	9	12	16
46	6.00	25.0	87	112	143	196
49	5.70	23.9	83	107	137	188
50	0.50	2.8	10	13	16	22
51	3.12	14.1	49	63	81	111
52	0.33	2.0	7	9	11	15
53	1.91	9.2	32	41	52	72
53B	0.74	4.0	14	18	23	31
54	1.35	6.8	24	30	39	53
56	0.65	3.6	12	16	20	28

Tabella 9 – Portata al colmo per diversi tempi di ritorno per gli affluenti in destra dal rio Veilino al rio Ruinà (Valutazioni condotte in base al metodo razionale).

3.5 Portate di progetto

Il Piano di Bacino definisce in corrispondenza del tratto terminale tombato del torrente Bisagno una portata associata a un tempo di ritorno di 200 anni pari a 1.301 m^3/s (nodo T).

La progettazione dello scolmatore del torrente Bisagno è stata basata sull'ipotesi che l'officiosità idraulica di tale tratto potesse incrementarsi, dal valore originario di circa 500 m^3/s, sino alla portata di 850 m^3/s a completamento degli interventi di sistemazione.

Lo scolmatore è stato dimensionato nel corso delle varie fasi progettuali pregresse con l'obiettivo di garantire che nell'alveo a valle dell'opera di presa, in corrispondenza dell'evento di piena con tempo di ritorno 200 anni (portata massima in ingresso valutata pari a 1.049 m^3/s dal Piano di Bacino - nodo M), defluisca una portata non superiore a 630 m^3/s, in grado di transitare con adeguate condizioni di sicurezza idraulica.

Il progetto definitivo del 2007 prevedeva la derivazione, in concomitanza dell'evento di piena duecentennale, di una portata massima pari a circa 513 m^3/s (arrotondata a 520 m^3/s), corrispondente alla somma dei seguenti contributi: 417 m^3/s dal Bisagno (arrotondati a 420 m^3/s), 80 m^3/s dal Fereggiano, 9 m^3/s dal Rovare e 7 m^3/s dal Noce. Tali valori sono maggiori di quelli originariamente definiti nel progetto preliminare.

Nel progetto esecutivo dello scolmatore del Fereggiano (attualmente in fase di realizzazione) le portate di riferimento per i dimensionamenti idraulici sono state ulteriormente incrementate, considerando un tempo di ritorno superiore: 87 m^3/s dal Fereggiano, 26 m^3/s dal Rovare e 23 m^3/s dal Noce, per un totale di 136 m^3/s complessivi.

Per le finalità del progetto esecutivo, secondo le indicazioni del RUP, si è assunto che la portata derivata dalla presa del Bisagno possa essere in grado da sola di garantire condizioni di compatibilità idraulica nel tratto tombato, derivando cioè una portata massima pari a circa 1.300 m^3/s – 850 m^3/s = **450 m^3/s**. Non si considera in questo modo l'apporto dato dallo scolmatore del Fereggiano per maggior cautela, tenendo conto della possibile non contemporaneità dei colmi di piena dei due corsi d'acqua.

Con la nuova impostazione prevista per il cantiere è risultato inoltre possibile captare anche la portata di piena del rio Sciorba, che da Piano di Bacino risulta alla confluenza pari a 8,5 m^3/s. Per massima cautela le opere a valle dell'immissione di tale apporto (captato mediante la galleria di accesso alla camera di montaggio della fresa) sono state dimensionate considerando una portata arrotondata di **460 m^3/s**, ovvero assumendo (improbabili) condizioni di contemporaneità tra il picco di piena del rio e la massima derivazione di portata dal Bisagno.

In maggior dettaglio, il Piano di Bacino indica quanto segue.

"Il rio Sciorba è un piccolo affluente in sponda sinistra del torrente Bisagno nei pressi dell'area occupata dal Macello Civico di piazzale Bligny.

(…) il tratto più a monte scorre a cielo libero e presenta le caratteristiche di alveo torrentizio sistemato con salti di fondo; successivamente attraversa un tratto tombinato non ispezionabile che attraversa i fabbricati della Posta e dell'ASL; infine percorre tombinato la strada che separa l'ex canile municipale dal Mattatoio con sezione rettangolare di dimensioni interne pari a 2x2 m nel tratto iniziale per ridursi poi a 1,3x1,4 m fino allo sbocco nel Bisagno[4]."

Il fosso è costituito da una ripida incisione che drena una porzione di versante prospiciente alla prevista area di cantiere, e, come sopra descritto, giunto in corrispondenza del fabbricato occupato dalle Poste viene intubato e prosegue tombato fino allo sbocco in Bisagno.

Il bacino contribuente alla sezione di inizio tombamento, tracciato su Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000, è individuato in Figura 3-6 e risulta di superficie pari a circa 0,11 km^2.

La portata di piena di progetto è da calcolarsi secondo le modalità definite dal Piano di Bacino, il quale prevede che: *"per i corsi d'acqua minori, nonché per gli affluenti dei torrenti principali con bacino inferiore a 2,0 km^2, salvo diversa indicazione prevista nel presente Piano, si assume una portata massima ottenuta utilizzando un contributo unitario pari a 40 m^3/s per ogni chilometro quadrato di superficie del bacino sotteso".* Questo valore, riferibile ad un tempo di ritorno di 200 anni, è desunto dalla Curva di Inviluppo delle portate di Piena fornita dall'Istituto Idrografico di Genova (curva del Cati).

[4] Autorità di Bacino Regionale, "Torrente Bisagno – Piano di Bacino Stralcio per la tutela del rischio idrogeologico, Relazione generale", http://www.pianidibacino.ambienteinliguria.it

Per il bacino del fosso in esame alla sezione di chiusura presso l'inizio della tombinatura la portata di progetto risulta quindi pari a circa Q = 4,50 m³/s.

In relazione ai valori di pendenza media (20%) e lunghezza dell'asta di drenaggio (0,96 km) è possibile valutare un tempo di corrivazione pari a circa 7 minuti (ad esempio con la formula di Pezzoli, adatta per bacini di piccole dimensioni). Si evidenzia pertanto come una portata di colmo così elevata corrisponda in realtà a un idrogramma di "flash flood" molto stretto, con volumi idrici modesti (dell'ordine dei 2.500 m³).

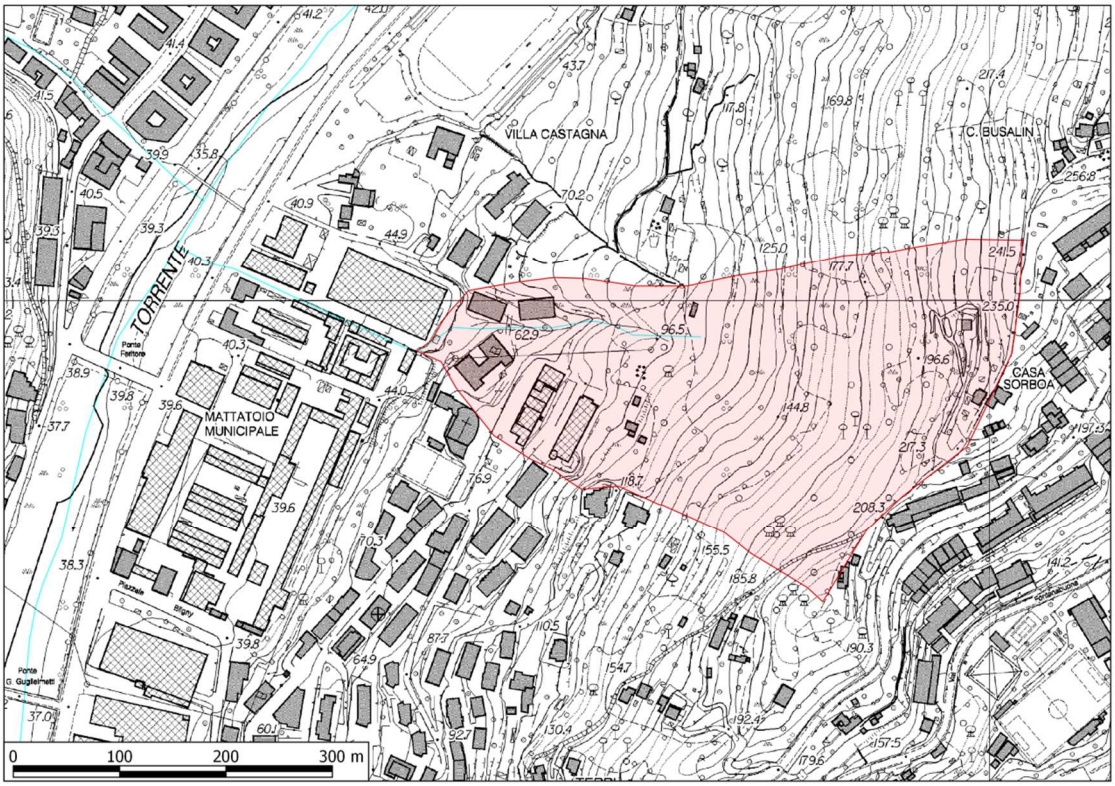


Figura 3-6 – Sviluppo del fosso Sciorba e bacino contribuente individuato su CTR in scala 1:10.000.

Per le finalità del presente progetto si è comunque considerato di captare una portata massima superiore al valore sopra indicato e pari a **8,5 m³/s**, dimensionando di conseguenza le opere.

Tale portata di progetto è definita nel Piano di Bacino stralcio del torrente Bisagno, e fa riferimento a un'area contribuente maggiore (quasi doppia) rispetto all'effettivo bacino sotteso alla sezione di tombamento, considerando l'intera area interclusa tra i bacini contribuenti dei due corpi idrici contigui (comprendendo quindi anche aree non direttamente afferenti al rio).

Nel complesso, pertanto, la portata defluente nel canale scolmatore dal torrente Bisagno è pari a **450 m³/s**; il contributo del fosso Sciorba, convogliato tramite la galleria di servizio all'interno del canale scolmatore stesso, è pari a **8,5 m³/s**, per una portata complessiva arrotondata a **460 m³/s**.

4 AGGIORNAMENTO DELL'ANALISI IDROLOGICA

4.1 Aggiornamento dell'analisi delle piogge intense dell'asta principale e degli affluenti in sponda sinistra

Di seguito vengono descritte le attività svolte al fine di verificare gli effetti conseguenti l'estensione del set di informazioni relativo alle precipitazioni, sulla base degli aggiornamenti ad oggi disponibili, confrontando le relative LSPP con quelle del Piano di bacino stralcio del torrente Bisagno.

Nel dettaglio si è proceduto aggiornando l'analisi idrologica (nel PdB eseguita sulla base dei dati pluviometrici disponibili fino all'anno 1991) in funzione dei dati registrati dai pluviometri (ove disponibili) sino all'anno 2017 e confrontandone i risultati con quelli ottenuti con la medesima analisi eseguita sui dati "storici" (fino al '91).

4.1.1 Estensione della base dati con le osservazioni recenti disponibili

L'analisi per la ricostruzione aggiornata delle LSPP è basata su set di dati costituiti dai valori massimi delle altezze di precipitazioni cumulata di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore attinenti alle stazioni pluviometriche di Genova-Università, Ponte Carrega e Viganego (cfr. ALLEGATO 1), le uniche ad essere rimaste attive in anni recenti tra quelle considerate nell'analisi delle precipitazioni svolta nel PdB e riportate sia in Tabella 10 che in Figura 4-1.

	Stazione	Comune	Bacino	Sottobacino	Lat.	Lon.	Quota	Apparecchio			
							[m]	Tipo	Inizio	Alt. [m]	#anni
a)	Genova Univ.	Genova	P/B	-	44°25'	3°32'W	21	Pr	1932	25	56
b)	Genova S.I.	Genova	B	-	44°24'	3°31'W	2	Pr	1951	30	27
c)	Ponte Carrega	Genova	B	-	44°26'	3°29'W	26	Pr	1954	2.1	30
d)	S.Eusebio	Genova	B	-	44°27'	3°28'W	240	Pr	1939	-	20
e)	Prato	Genova	B	-	44°27'	3°26'W	89	Pr	1957	2	22
f)	Viganego	Bargagli	B	Lentro	44°26'	3°23'W	400	Pr	1954	2	34
g)	Scoffera	Torriglia	B	-	44°29'	3°20'W	678	Pr	1952	2	28

Tabella 10 – Elenco e caratteristiche delle stazioni pluviometriche esaminate nel PdB stralcio del Torrente Bisagno.

Le registrazioni della stazione Genova-Università presentano una serie di dati non completa negli anni recenti per cui si è deciso, vista la vicinanza spaziale, di integrarla con la serie di dati più recenti della stazione Genova-Centro Funzionale (dall'anno 2003 al 2017). La stazione Genova-Ponte Carrega recentemente ha cambiato nome identificativo in Genova-Gavette, di conseguenza i due set di dati sono stati accorpati e considerati come di un'unica stazione Genova-Ponte Carrega integrata con Genova-Gavette. Le caratteristiche delle stazioni sono descritte in Tabella 11.

	Stazione	Comune	Bacino	Sottobacino	Lat.	Lon.	Quota	Apparecchio		
							[m]	Tipo	Inizio	#anni
a)	Genova-Università	Genova	P/B	-	44° 24' 56,196"	8° 55' 37,488"	21	Pr	1932	67
c)	Ponte Carrega	Genova	B	-	44° 26' 18,708"	8° 57' 45,720"	30	Pr	1954	38
f)	Viganego	Bargagli	B	Lentro	44° 25' 42,456"	9° 3' 48,528"	430	Pr	1954	56
h)	Genova-Centro Fun.	Genova	B	-	44° 24' 1,26"	8° 56' 45,276"	30		2003	15
i)	Genova-Gavette	Genova	B	-	44° 26' 3,804"	8° 57' 39,924"	30		2001	15

Tabella 11 – Elenco e caratteristiche delle stazioni pluviometriche aggiornate al 2017.

Come anticipato, per ogni stazione pluviometrica si è proceduto analizzando le massime altezze di precipitazione di durata 1÷24 ore secondo una serie "storica" (sino al 1991, base dati di riferimento per il PdB) e secondo una serie "completa", aggiornata con i dati degli anni recenti.

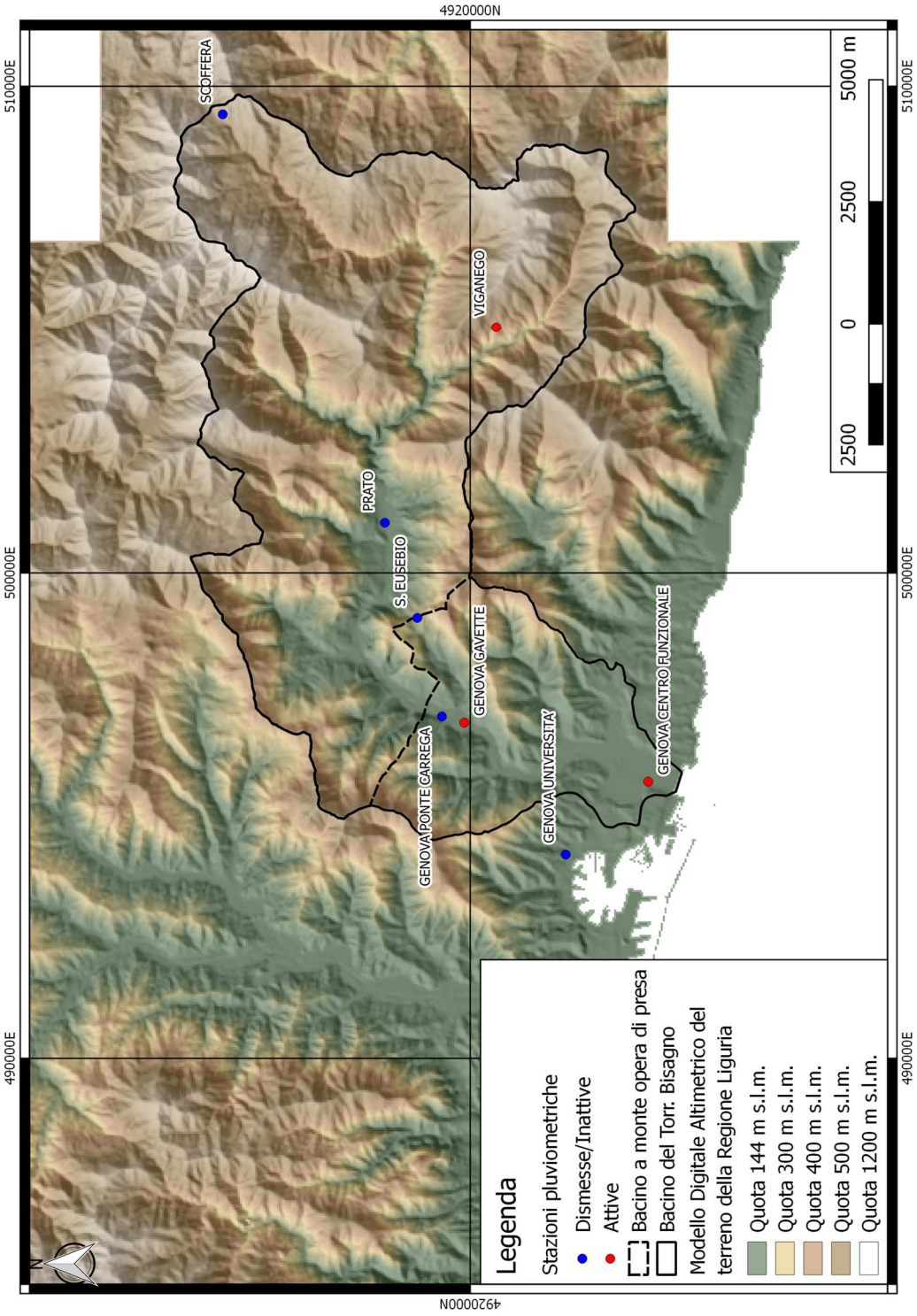


Figura 4-1 – Corografia dell'area di interesse con ubicazione delle stazioni pluviometriche considerate nello studio (CRS: WGS 84 / UTM zone 32N).

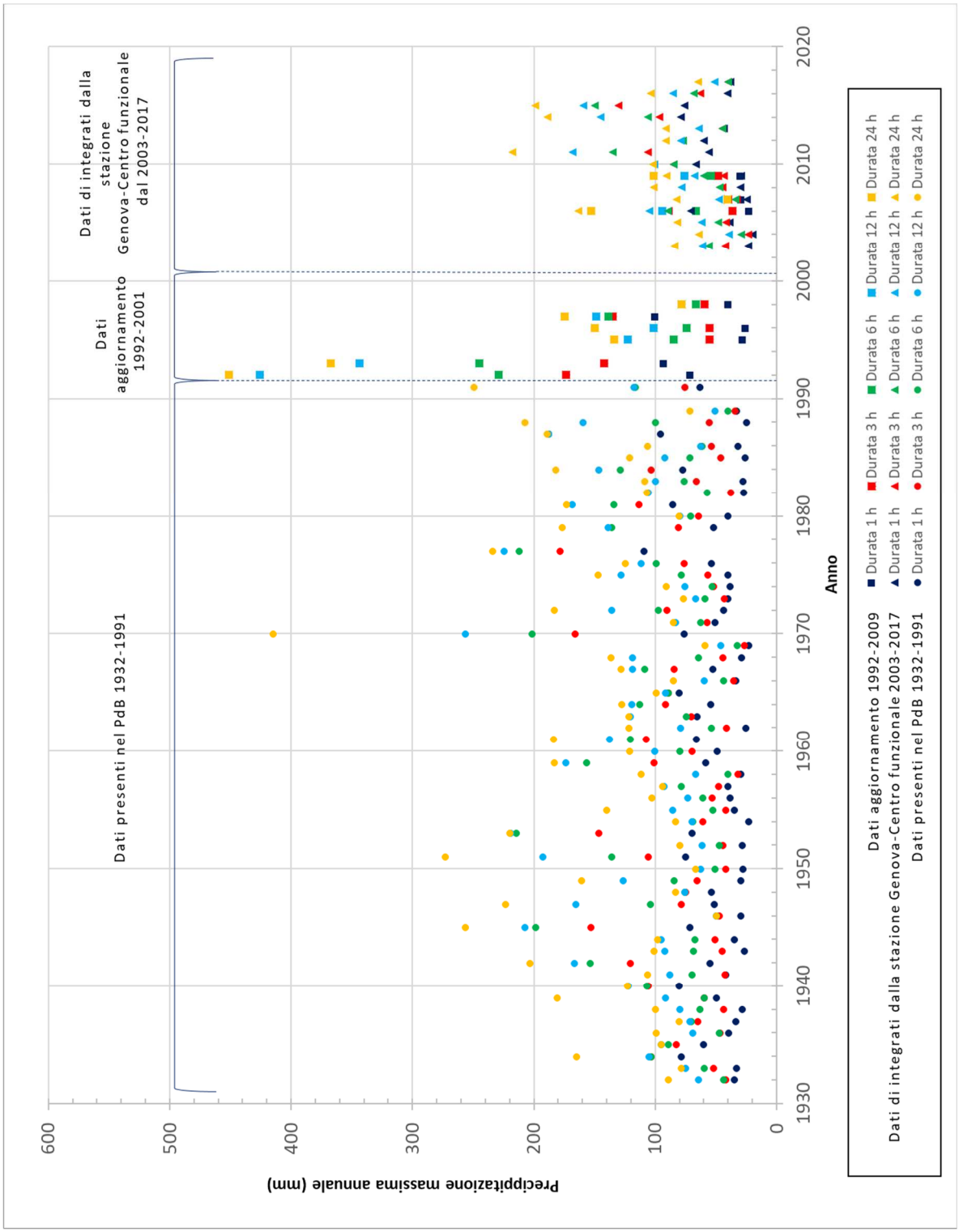


Figura 4-2 – Valori annuali delle massime altezze di precipitazione per durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore della Stazione Genova-Università integrata con i dati della stazione Genova-Centro funzionale.



Figura 4-3 – Valori annuali delle massime altezze di precipitazione per durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore della Stazione Viganego.

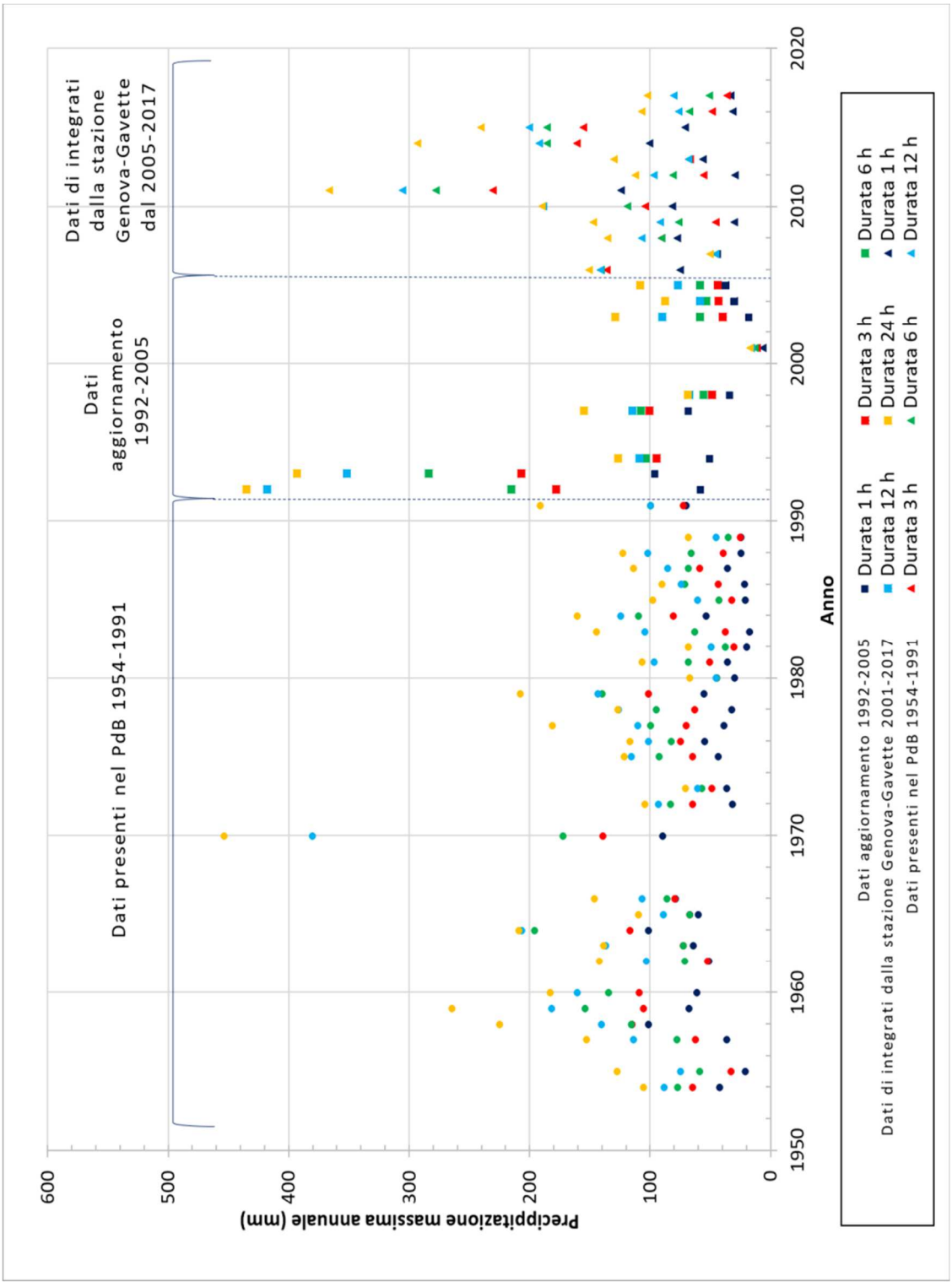


Figura 4-4 – Valori annuali delle massime altezze di precipitazione per durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore della Stazione Genova-Ponte Carrega integrata con la Stazione di Genova-Gavette.

4.1.2 *Analisi mediante le distribuzioni probabilistiche Log-normale, Gamma e Gumbel*

Le serie "storica" e "completa" delle stazioni Genova-Università (integrata per il periodo recente con i valori di Genova-Centro funzionale), Viganego e Ponte Carrega (integrata con la stazione di Genova Gavette) sono state sottoposte a regolarizzazione con l'obiettivo di determinare delle altezze di precipitazione con tempi di ritorno di 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni.

Alle serie storiche delle osservazioni sono state adattate 3 diversi tipi di distribuzioni probabilistiche "standard":

- log-normale (Galton), con parametri s,m:

$$f(y)dy = \left(\frac{0.3989}{y \cdot s}\right) \cdot e^{\left(-(\ln y - m)^2 / 2s^2\right)} dy$$

- Pearson Type III (funzione gamma), con parametri s,p,a:

$$f(y)dy = \left(\frac{1}{s \cdot gamma(p)}\right) \cdot \left(\frac{y-a}{s}\right)^{p-1} \cdot e^{(y-a)/s} ds$$

- Fisher-Tippet Type I (Gumbel), con parametri a,z:

$$f(y)dy = \frac{1}{a} \cdot e^{\left(-y-z/a - e^{\left(-y-z/a\right)}\right)} dy$$

Per determinare la distribuzione di probabilità con il miglior adattamento alle serie di dati di misura è stato condotto il test statistico di adattamento di Smirnov-Kolmogorov, i cui risultati sono riportati in Tabella 12, in termini di indice probabilistico compreso tra 0 e 1 (più l'indice è prossimo a 1, maggiore è la probabilità che la curva soggiaccia alla distribuzione campionaria).

Serie	Durate (ore)	Genova-Università integrata con Genova-Centro funzionale			Viganego			Genova-Ponte Carrega integrata con Genova-Gavette		
		log-normale (Galton)	Pearson Type III (funz. gamma)	Fisher-Tippett Type I (Gumbel)	log-normale (Galton)	Pearson Type III (funz. gamma)	Fisher-Tippett Type I (Gumbel)	log-normale (Galton)	Pearson Type III (funz. gamma)	Fisher-Tippett Type I (Gumbel)
Antecedente il 1991	1	0,6441	0,9436	0,5129	0,8911	0,9802	0,7848	0,9894	0,9978	0,9576
	3	0,8308	0,9756	0,6366	0,9920	0,9974	0,9794	0,9648	0,9964	0,9933
	6	0,7193	0,9867	0,5564	0,9098	0,9979	0,9724	0,9999	0,9999	0,9996
	12	0,9336	0,9999	0,8689	0,9874	0,9985	0,9887	0,9863	0,9842	0,9926
	24	0,7827	0,9571	0,6508	0,8810	0,9999	0,9966	0,9998	0,9995	0,9960
Completa	1	0,6156	0,9415	0,4561	0,9997	0,9999	0,9950	0,9952	0,9941	0,7503
	3	0,5706	0,8549	0,3486	0,9781	0,9797	0,9956	0,9978	0,9780	0,8519
	6	0,7301	0,9778	0,4479	0,9731	0,9801	0,9938	0,9837	0,9344	0,7070
	12	0,8781	0,9737	0,5822	0,5183	0,5753	0,6191	0,6336	0,5578	0,3251
	24	0,3125	0,7384	0,1593	0,2294	0,4455	0,3320	0,6111	0,5589	0,5452

Tabella 12 – Tabelle dei risultati del test di Kolmogorov-Smirnov per ogni distribuzione.

Le elaborazioni svolte hanno permesso di individuare la distribuzione probabilistica di Pearson - Type III (funzione gamma) come quella caratterizzata dal migliore adattamento e dalla quale è stato possibile

ricavare le curve di possibilità climatica per i tempi di ritorno scelti, espresse nella forma monomia $h=a*t^n$, i cui parametri sono indicati nelle Tabella 13, Tabella 14 e Tabella 15.

	Genova-Università integrata con Genova-Centro funzionale						
Serie storica	**parametri**	***TR10***	***TR20***	***TR50***	***TR100***	***TR200***	***TR500***
antecedente al 1991	***n***	0,333	0,332	0,331	0,33	0,33	0,329
	a	84,55	101,6	123,68	140,23	156,62	178,22
completa	***n***	0,335	0,335	0,334	0,333	0,332	0,332
	a	86,32	104,29	127,58	145,09	162,4	185,19

Tabella 13 – Tabella dei parametri a e n delle curve climatiche per la stazione Genova-Università integrata con Genova-Centro funzionale per diversi tempi di ritorno.

	Viganego						
Serie storica	**parametri**	***TR10***	***TR20***	***TR50***	***TR100***	***TR200***	***TR500***
antecedente al 1991	***n***	0,306	0,28	0,251	0,233	0,218	0,202
	a	71,47	84,56	102,34	115,92	129,4	147,09
completa	***n***	0,348	0,329	0,309	0,296	0,284	0,271
	a	72,1	84,5	100,25	111,86	123,21	138,08

Tabella 14 – Tabella dei parametri a e n delle curve climatiche per la stazione Viganego per diversi tempi di ritorno.

	Genova-Ponte Carrega integrata con Genova-Gavette						
Serie storica	**parametri**	***TR10***	***TR20***	***TR50***	***TR100***	***TR200***	***TR500***
antecedente al 1991	***n***	0,345	0,339	0,333	0,329	0,326	0,323
	a	80,68	96,44	116,73	131,82	146,72	166,21
completa	***n***	0,362	0,365	0,368	0,369	0,37	0,372
	a	95,03	115,15	140,8	160,04	178,85	203,43

Tabella 15 – Tabella dei parametri a e n delle curve climatiche per la stazione Genova-Ponte Carrega integrata con Genova-Gavette per diversi tempi di ritorno.

Dal confronto delle curve di possibilità pluviometrica ricavate per le due serie di dati regolarizzate (antecedente al 1991 e completa) si osserva per quelle aggiornate un incremento delle altezze di precipitazione per durate superiori a circa 3 ore e per tutti i tempi di ritorno esaminati, così come raffigurato nei grafici di seguito.

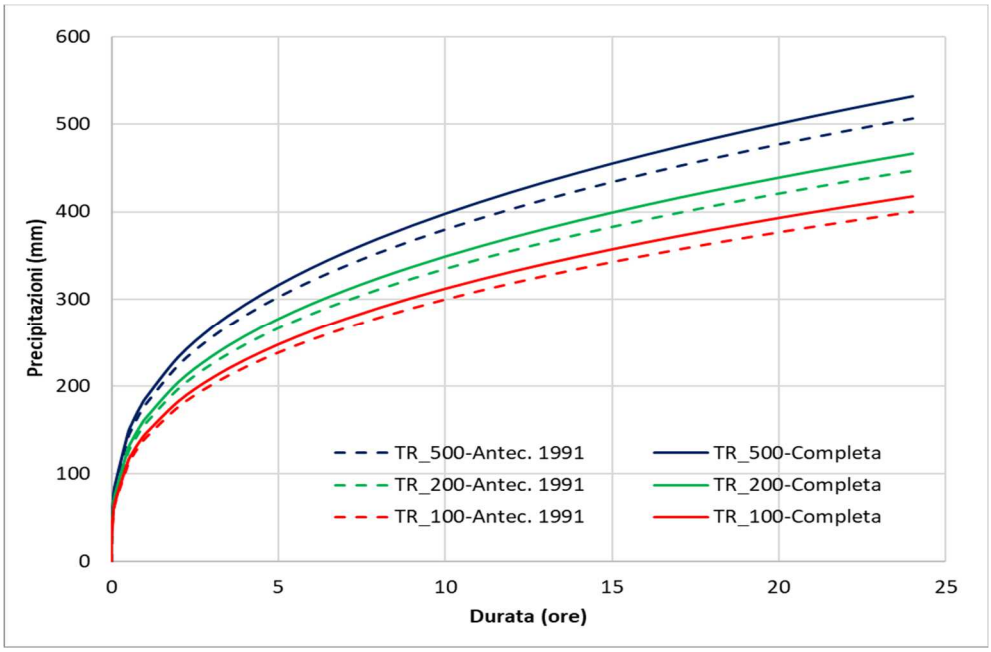


Figura 4-5 – Stazione pluviometrica Genova-Università integrata con Genova-Centro funzionale- Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica ricavate dalle serie storiche antecedente il 1991 (tratteggiate) e completa (continue) per eventi con TR pari a 100, 200 e 500 anni.

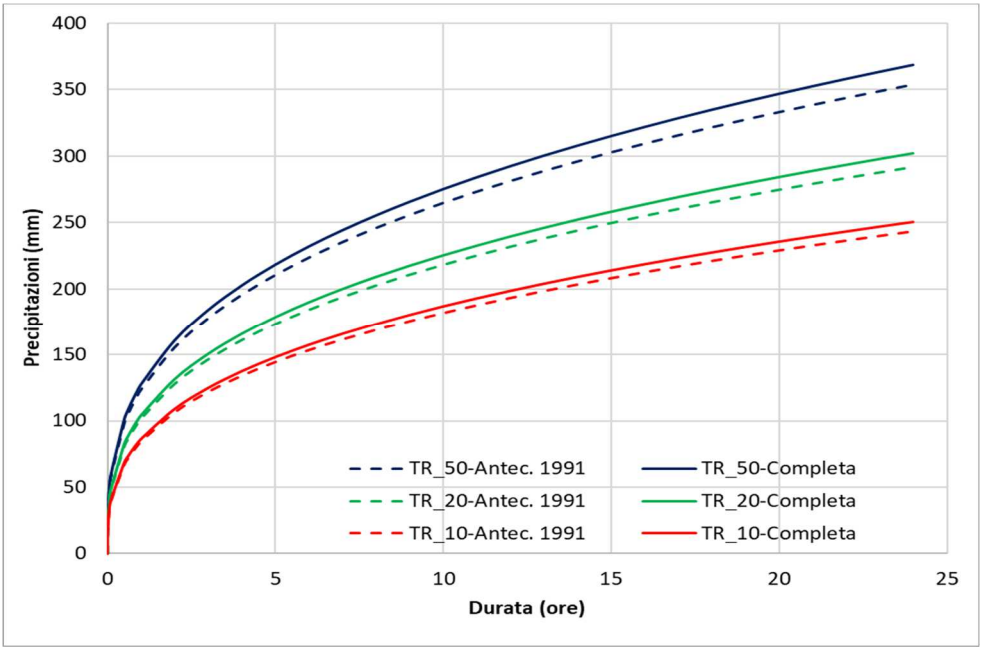


Figura 4-6 – Stazione pluviometrica Genova-Università integrata con Genova-Centro funzionale - Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica ricavate dalle serie storiche antecedente il 1991 (tratteggiate) e completa (continue) per eventi con TR pari a 10, 20 e 50 anni.

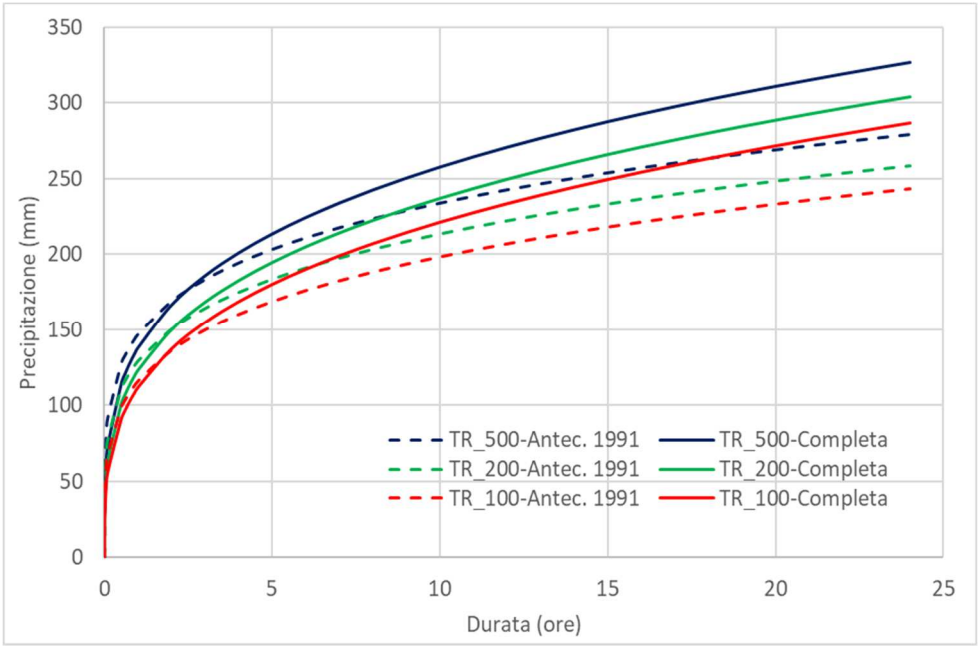


Figura 4-7 – Stazione pluviometrica Viganego - Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica ricavate dalle serie storiche antecedente il 1991 (tratteggiate) e completa (continue) per eventi con TR 100, 200 e 500 anni.

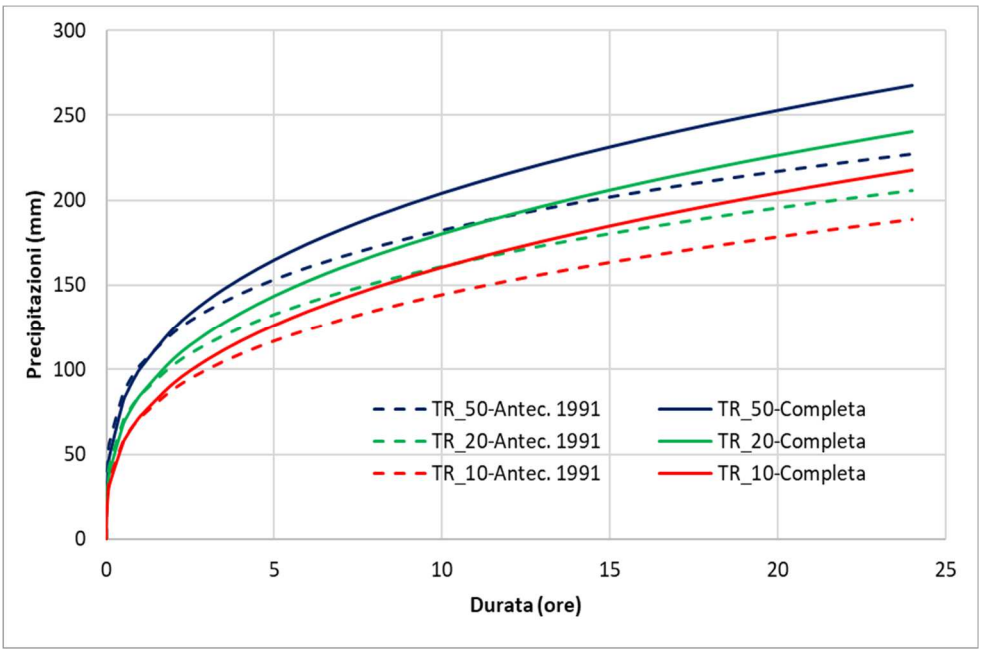


Figura 4-8 – Stazione pluviometrica Viganego - Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica ricavate dalle serie storiche antecedente il 1991 (tratteggiate) e completa (continue) per eventi con TR pari a 10, 20 e 50 anni.

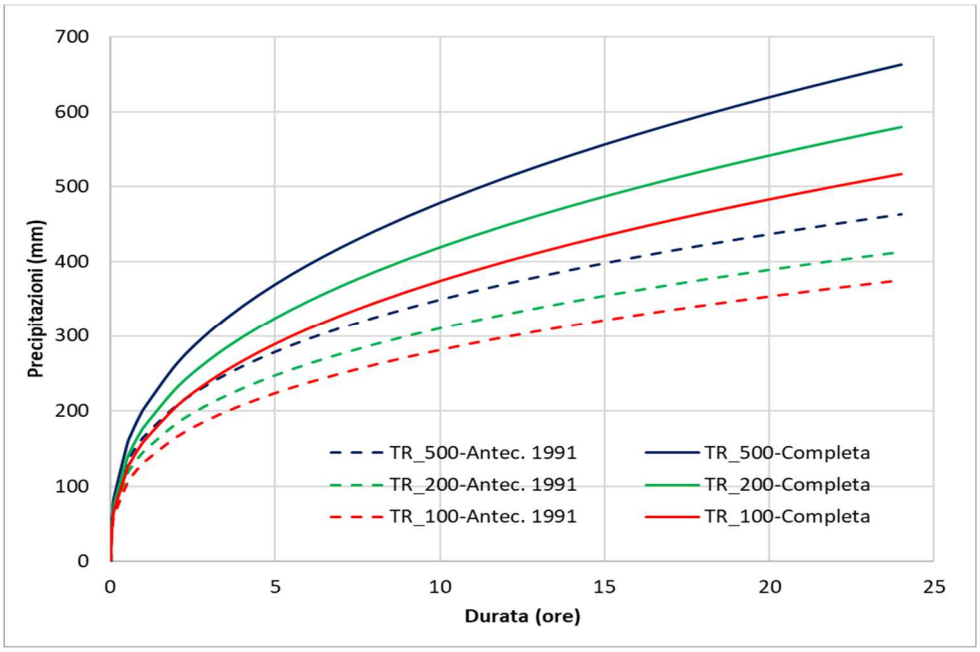


Figura 4-9 – Stazione pluviometrica Genova-Ponte Carrega integrata con Genova-Gavette - Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica ricavate dalle serie storiche antecedente il 1991 (tratteggiate) e completa (continue) per eventi con TR pari a 100, 200 e 500 anni.

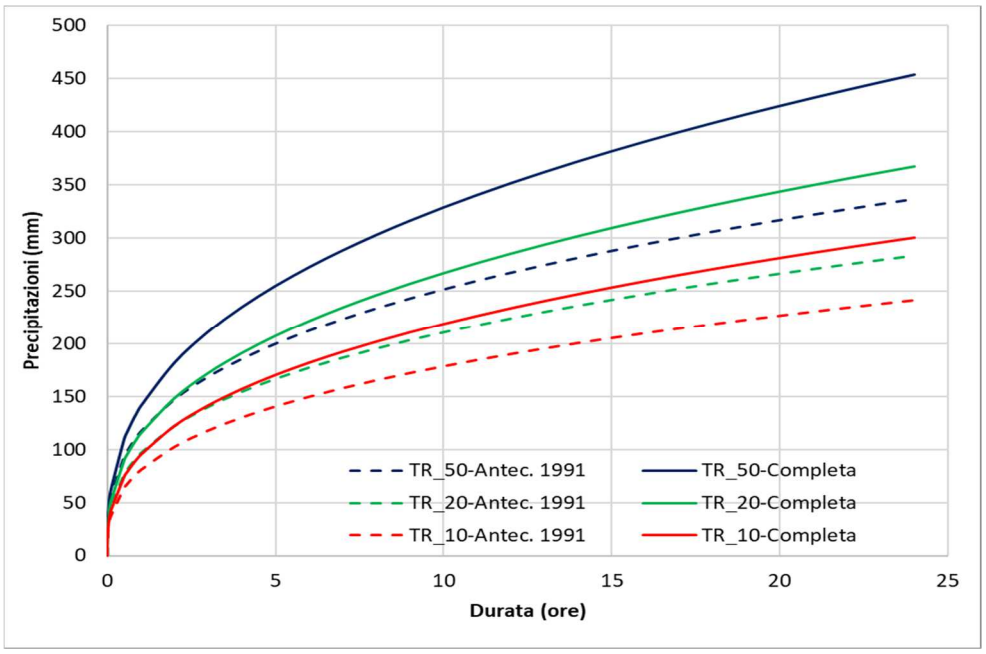


Figura 4-10 – Stazione pluviometrica Genova-Ponte Carrega integrata con Genova-Gavette - Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica ricavate dalle serie storiche antecedente il 1991 (tratteggiate) e completa (continue) per eventi con TR pari a 10, 20 e 50 anni.

Con riferimento alla discretizzazione dei tratti fluviali condotta nel Piano di Bacino, la sezione idrologica di riferimento per il presente progetto è la sez. M (circa coincidente con la sezione di presa dello scolmatore), caratterizzata da un tempo di corrivazione pari a 2,97 h (cfr. Tabella 3).

Per miglior leggibilità dei risultati è stato dunque prodotto un confronto tra le altezze di pioggia corrispondenti a una durata di 3 h ottenute per le stazioni di Genova Università (integrata per il periodo recente con i dati del pluviometro Genova C.F.), di Viganego e di Genova-Ponte Carrega (integrata con Genova-Gavette) in riferimento sia alla serie di dati "storica" che a quella "completa". I risultati sono riportati in Tabella 16.

Stazioni	Serie di dati		Precipitazione prevista					
		Durata	TR 10	TR 20	TR 50	TR 100	TR 200	TR 500
		(ore)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Genova Università	Antec. 1991	3	122	146	178	202	225	256
	Completa	3	125	151	184	209	234	267
Viganego	Antec. 1991	3	100	115	135	150	164	184
	Completa	3	106	121	141	155	168	186
Genova-Ponte Carrega	Antec. 1991	3	118	140	168	189	210	237
	Completa	3	141	172	211	240	269	306

Tabella 16 – Altezze di pioggia per durata 3h per le stazioni pluviometriche di Genova Università integrata con i dati recenti di Genova Centro Funzionale, Viganego e Genova-Ponte Carrega integrata con Genova-Gavette in riferimento alle serie di dati "storica" e "completa".

Relativamente al tempo di ritorno di progetto (TR=200 anni), l'aggiornamento dell'analisi idrologica fornisce un incremento della precipitazione pari a circa il 4% per la stazione "Genova Università", circa del 2,4% per quella di Viganego e circa del 28% per quella di "Genova Ponte Carrega". Maggiori scostamenti nei primi due siti si riscontrerebbero per durate di pioggia superiori.

4.1.3 Analisi mediante modello lognormale dissipativo

Per analogia con le analisi alla base del Piano di Bacino si è inoltre proceduto analizzando le precipitazioni mediante il modello lognormale dissipativo utilizzato dall'Autorità di Bacino (cfr. capitolo 2.2). Analogamente a quanto descritto nel capitolo precedente è stata aggiornata la matrice pluviometrica con i dati recenti disponibili (periodo 1992-2017).

Secondo il modello considerato, le Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica per un qualunque sito interno al bacino del torrente Bisagno possono essere valutate tramite la formulazione:

$$h_R(t) = \frac{a_1^2}{\sqrt{a_2}} \exp\left[\sqrt{\ln\left(\frac{a_2}{a_1^2}\cdot T^{2(\varphi_2-1)n}\right)}\,\Phi^{-1}(1-1/R)\right] T^{(2-\varphi_2)n}$$

ove i 4 parametri a_1, a_2, n, φ_2 vengono stimati mediante regressione statistica con metodo dei minimi quadrati. Nel dettaglio, la determinazione di a_1 (media delle piogge massime cadute in una durata unitaria) e dell'esponente n si effettua *"mediante la regressione delle medie delle altezze di pioggia calcolate in base alle osservazioni per le varie durate, contro le stesse durate esaminate*[5]*"* utilizzando la seguente equazione:

[5] Regione Liguria, Autorità di Bacino Regionale, "Torrente Lavagna - Piano di Bacino Stralcio per l'Assetto Idrogeologico - Idrologia", Pubblicazione sul BURL n. 17 del 27/04/2016

$$min_{a_1,n} \sum_{k=1}^{n_T} [ln(m_k) - ln(a_1) - n \cdot ln(T_k)]^2$$

Allo stesso modo, noti i parametri a_1 e n, *"si potranno stimare i valori del momento di secondo ordine relativo alla durata unitaria, a_2, ed il relativo esponente di scala, $2\varphi_2$, mediante la regressione dei valori campionari dei momenti del secondo ordine contro le durate stesse. …omissis…Come per il modello scala-invariante, con il modello dissipativo si può anche operare a scala regionale, stimando i quattro parametri del modello per ogni stazione pluviografica del territorio in esame e interpolando opportunamente tali stime nello spazio. Si ottengono in tal modo mappe dei parametri a_1, a_2, n e φ_2, in base alle quali si possono valutare le linee segnalatrici in ogni punto della regione (Burlando e Rosso, 1996), in cui si voglia localizzare il centro di scroscio[5]."*

Poiché per la presente analisi le equazioni sono state risolte per via numerica, a titolo di verifica della correttezza del modello applicato la determinazione dei parametri della distribuzione è stata effettuata in primo luogo con riferimento ai dati di altezza di pioggia massima annuale (h(T), in mm) riportati nel Piano di Bacino, in funzione dei quali sono state calcolate le Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica, confrontandole con quelle riportate nel capitolo 2.2. L'analisi è stata eseguita per tutte e 7 le stazioni pluviometriche oggetto di studio.

Si riscontra la perfetta equivalenza tra i parametri a_1,a_2,n,Φ_2 forniti per ogni stazione pluviometrica nel Piano di Bacino e quelli calcolati come sopra descritto; a titolo di confronto si riportano i risultati dell'analisi effettuata per la stazione di Viganego.

Durata T	**1h**	**3h**	**6h**	**12h**	**24h**
mk (media campionaria) [mm]	41,9	65,3	86,4	114,2	146,9
a_1		**42,178**	**n**		**0,397**
mk (momento di ordine 2) [mm]	45,2	69,9	90,6	116,8	150,0
a_2		**2.088,563**	**$2\varphi_2$**		**0,951**

Tabella 17 – Durate T, media campionaria e momento di ordine 2 delle altezze di pioggia e parametri del modello lognormale dissipativo per la stazione pluviometrica di Viganego (periodo 1954-1991).

Utilizzando i 4 parametri di Tabella 17 per il calcolo dell'altezza di pioggia di durata T assegnata al variare del tempo di ritorno R sono state determinate le precipitazioni per ogni durata caratteristica delle Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica; il confronto con le corrispondenti curve da PdB è rappresentato in Figura 4-11. Si osserva un'ottima congruenza con i risultati riportati nel Piano di Bacino.

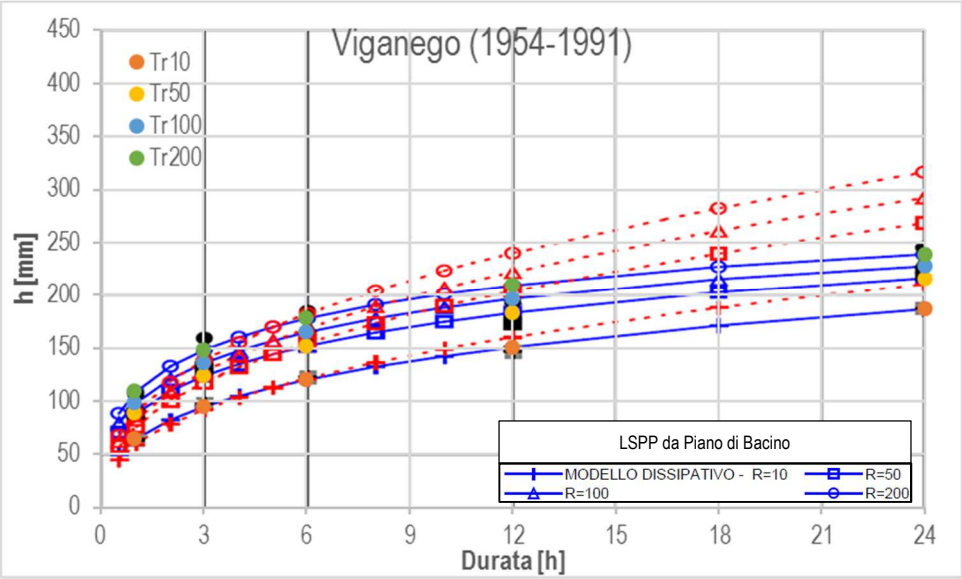


Figura 4-11 – Confronto tra i punti caratteristici delle LSPP ottenute per la stazione di Viganego (periodo 1954-1991) e le corrispondenti curve riportate nel Piano di Bacino (curve blu, linea continua).

Verificata dunque la validità dell'analisi eseguita, si è proceduto aggiornando le Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica in funzione dei dati recenti (periodo complessivo, fino al 2017) per le uniche tre stazioni in cui tali dati sono disponibili (cfr. capitolo 4.1.2). La modalità di analisi è la medesima descritta in precedenza; i parametri del modello lognormale dissipativo ottenuti sono riportati in Tabella 18, Tabella 19 e Tabella 20.

Durata T	**1h**	**3h**	**6h**	**12h**	**24h**
mk (media campionaria) [mm]	44,2	68,8	90,7	119,5	155,0
a_1		**44,435**	**n**		**0,396**
mk (momento di ordine 2) [mm]	48,0	74,8	96,3	126,1	161,7
a_2		**2.352,873**	**2 φ_2**		**0,965**

Tabella 18 – Durate T, media campionaria e momento di ordine 2 delle altezze di pioggia e parametri del modello lognormale dissipativo per la stazione pluviometrica di Viganego (periodo 1954-2017).

Durata T	**1h**	**3h**	**6h**	**12h**	**24h**
mk (media campionaria) [mm]	48,3	73,8	90,8	114,2	141,3
a_1		**49,470**	**n**		**0,335**
mk (momento di ordine 2) [mm]	52,9	83,1	103,3	130,9	160,0
a_2		**2.987,018**	**2 φ_2**		**1,035**

Tabella 19 – Durate T, media campionaria e momento di ordine 2 delle altezze di pioggia e parametri del modello lognormale dissipativo per la stazione pluviometrica di Genova Università integrata con i dati recenti di Genova Centro Funzionale (periodo 1932-2017).

Durata T	1h	3h	6h	12h	24h
mk (media campionaria) [mm]	50,3	77,5	97,4	123,7	156,0
a_1		**51,290**	**n**		**0,354**
mk (momento di ordine 2) [mm]	56,8	90,3	113,0	148,3	181,0
a_2		**3.415,835**	**2 φ_2**		**1,033**

Tabella 20 – Durate T, media campionaria e momento di ordine 2 delle altezze di pioggia e parametri del modello lognormale dissipativo per la stazione pluviometrica di Ponte Carrega integrata con i dati recenti di Genova Gavette (periodo 1954-2017).

Il confronto tra le curve ante e post aggiornamento evidenzia come l'introduzione del periodo recente incrementi in maniera marcata le precipitazioni (cfr. Figura 4-12, Figura 4-13 e Figura 4-14). In particolare, in riferimento al tempo di ritorno di progetto (duecentennale), l'incremento percentuale della precipitazione per durate caratteristiche è descritto in Tabella 16.

Sezione pluviometrica	Analisi idrologica	T=1h	T=3h	T=6h	T=12h	T=24h
Genova Università/Genova C.F.	PdB	139,53	201,78	254,67	321,41	405,64
	aggiornamento	141,42	217,03	283,76	370,47	483,02
	Δ%	+1,4	+7,6	+11,4	+15,3	+19,1
Viganego	PdB	109,23	148,76	178,17	209,65	239,17
	aggiornamento	119,70	170,35	211,71	261,73	321,42
	Δ%	+9,6	+14,5	+18,8	+24,8	+34,4
Ponte Carrega/Genova Gavette	PdB	128,93	197,81	258,98	338,90	443,29
	aggiornamento	167,90	260,50	343,18	451,64	593,84
	Δ%	+30,23	+31,69	+32,51	+33,27	+33,96

Tabella 21 – Altezze di pioggia caratteristiche delle LSPP per tempo di ritorno duecentennale per le stazioni pluviometriche di Genova Università integrata con i dati recenti di Genova Centro Funzionale, Viganego e P.Carrega (integrata con Genova Gavette) ante e post aggiornamento dell'analisi idrologica.

Confrontando le altezze di pioggia corrispondenti alla durata di 3h con quelle ottenute per Tr=200 anni mediante distribuzione Gamma (cfr. capitolo 4.1.2 - Tabella 16) si osserva come i valori "recenti" di Tabella 16 siano sostanzialmente in linea con quelli omologhi ottenuti mediante applicazione del metodo lognormale dissipativo.

La prima metodologia fornisce invece maggiori valori per la serie "storica" rispetto al modello lognormale dissipativo, per cui l'incremento percentuale dei valori di precipitazione dovuto all'aggiornamento risulta più marcato secondo quest'ultimo modello.

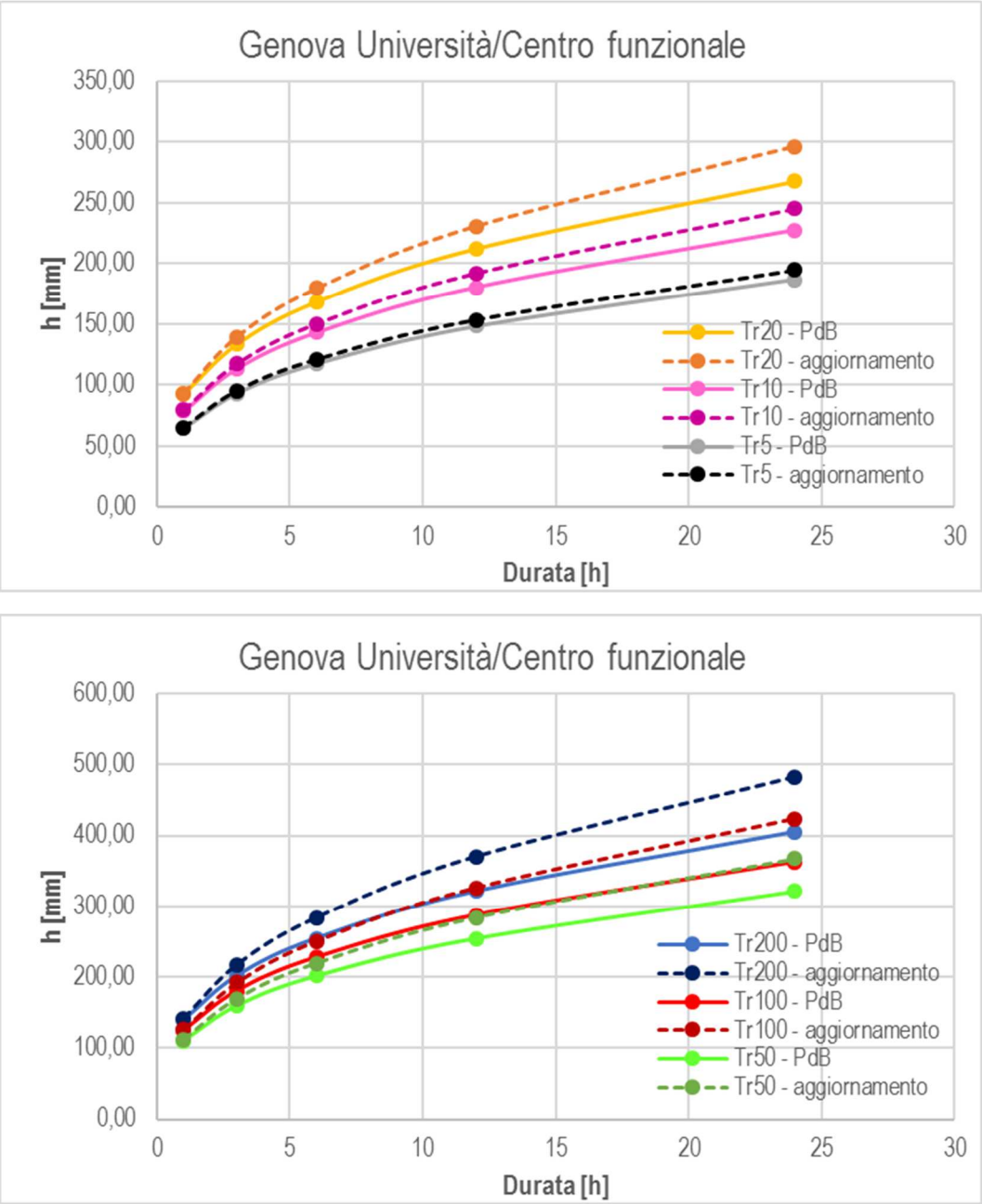
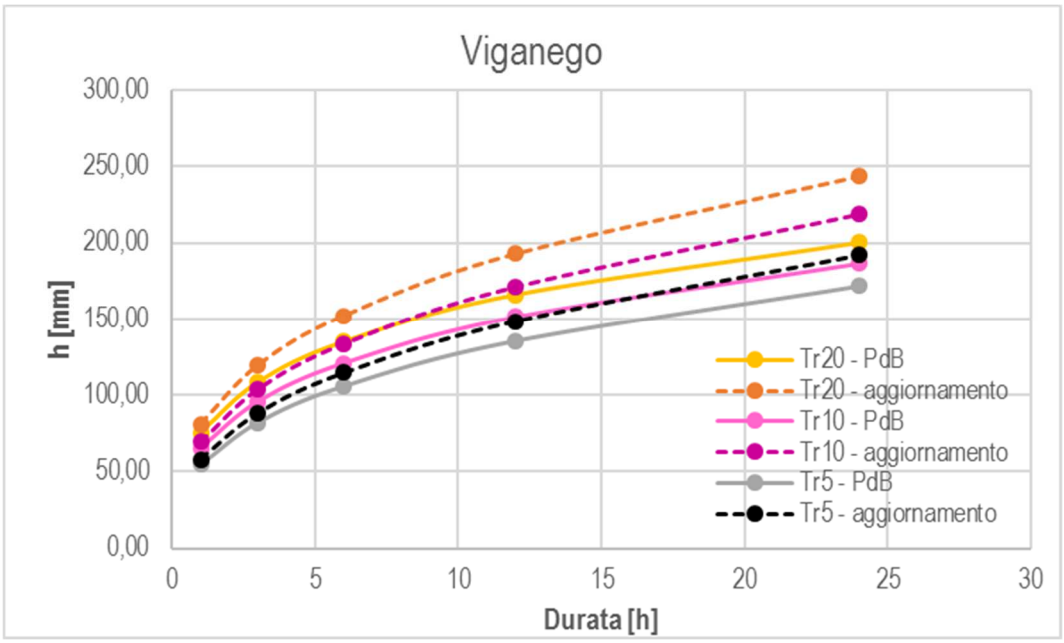


Figura 4-12 – Confronto tra le LSPP ottenute per la stazione di Genova Università integrata con i dati recenti di Genova Centro Funzionale sul periodo “storico” 1932-1991 e sul “complessivo” 1932-2017.



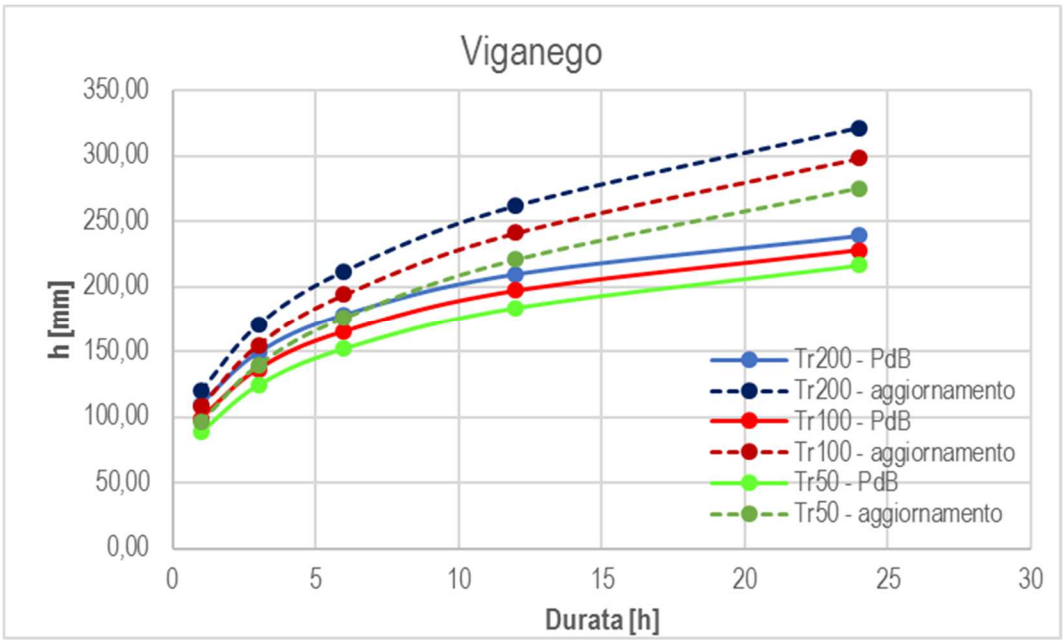
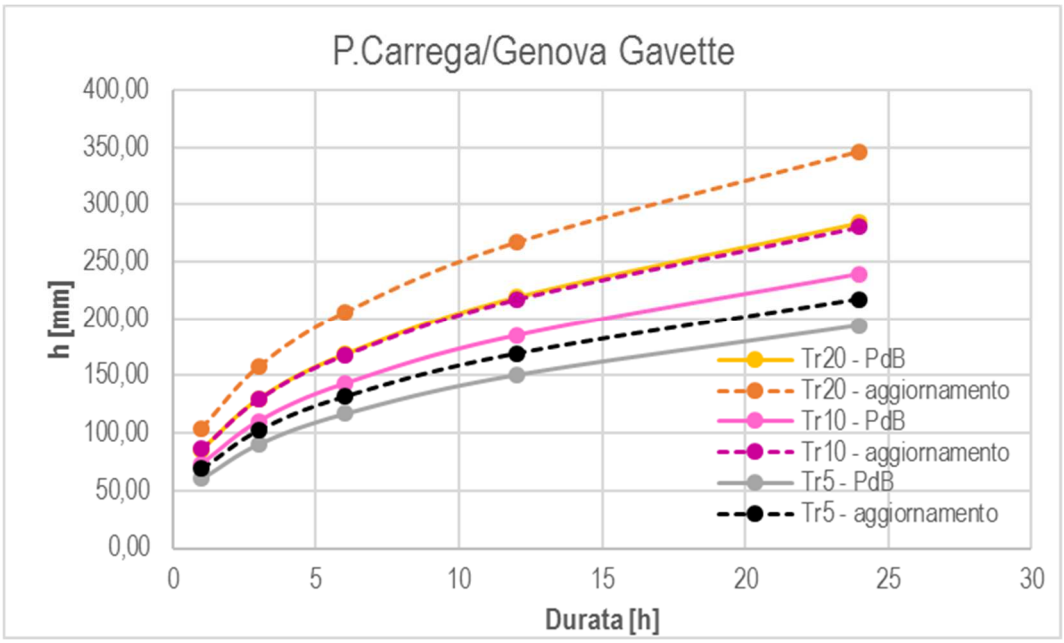


Figura 4-13 – Confronto tra le LSPP ottenute per la stazione di Viganego sul periodo “storico” 1954-1991 e sul “complessivo” 1954-2017.



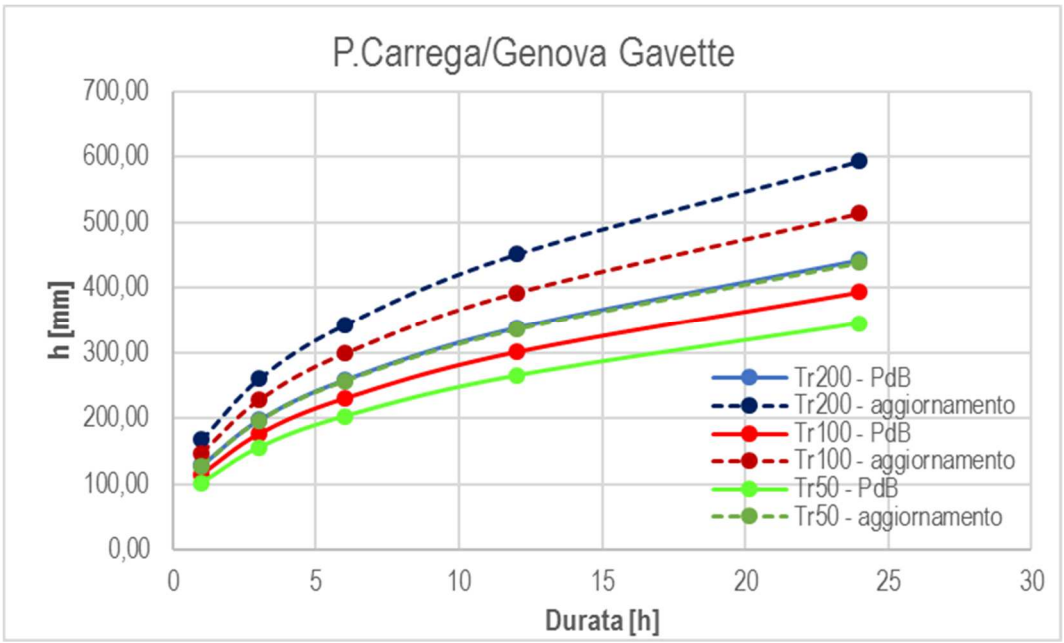


Figura 4-14 – Confronto tra le LSPP ottenute per la stazione di Ponte Carrega (integrata con Genova Gavette) sul periodo "storico" 1954-1991 e sul "complessivo" 1954-2017.

Con riferimento all'evento con tempo di ritorno duecentennale si è proceduto, nota l'ubicazione delle stazioni pluviometriche analizzate (Figura 4-1), determinando la precipitazione ragguagliata per i bacini sottesi dalle sezioni A, D, I, M, Q e T individuate nel capitolo 3.2. In particolare i parametri del metodo lognormale dissipativo di ogni bacino sono stati assunti pari alla media dei valori calcolati per i pluviometri rappresentativi per il bacino stesso.

L'aggiornamento dell'analisi idrologica è invece disponibile per tre sole stazioni pluviometriche. Relativamente alle sezioni di chiusura sul torrente Bisagno, la sezione di riferimento per il progetto in esame è la sez. M, caratterizzata da un tempo di corrivazione pari a 2,97 h (cfr. Tabella 3). La durata caratteristica delle Curve di Possibilità Pluviometrica di riferimento è pertanto pari a 3h, durata in

corrispondenza della quale l'aggiornamento dell'idrologia mediante modello lognormale dissipativo determina un incremento della precipitazione pari a circa +7,5% per il pluviometro "Genova Università", a circa +14,5% per la stazione di "Viganego" e a circa +31,7% per il pluviometro "Ponte Carrega".

L'incremento percentuale medio della precipitazione (media tra gli incrementi delle tre stazioni analizzate) è pari a circa 17,9%. Tale valore appare rappresentativo in quanto prossimo a quello di Viganego (porzione di testata del bacino) e alla media delle altre due stazioni, ubicate in posizione non troppo discosta nel tratto di valle del bacino. I valori aggiornati di h_{200} per ogni bacino analizzato sul torrente Bisagno sono stati pertanto determinati incrementando quelli pre-aggiornamento di tale valore percentuale medio.

Cautelativamente, a titolo di confronto per le finalità della presente analisi, sono stati anche calcolati i valori aggiornati di h_{200} per ogni bacino analizzato sul torrente Bisagno incrementando quelli pre-aggiornamento del 31,7%, pari al massimo incremento percentuale riscontrato per le tre stazioni pluviometriche. I valori che ne conseguono sono riportati in Tabella 22.

Sezione asta principale	Nodo	h_{200} [mm]	$h_{200,aggiornamento\ idrologia\ MEDIO}$ [mm]	$h_{200,aggiornamento\ idrologia\ MAX}$ [mm]
T. Bisagno monte t. Lentro	A	119,5	140,9	157,3
T. Bisagno valle t. Lentro	D	134,4	158,5	177,0
T. Bisagno valle rio Torbido	I	135,9	160,2	178,9
T. Bisagno valle t. Geirato	M	151,6	178,8	199,7
T. Bisagno monte t. Ferregiano	Q	173,1	204,1	228,0
T. Bisagno monte tratto tombato	T	176,1	207,6	231,9

Tabella 22 – Calcolo della pioggia per l'evento con tempo di ritorno duecentennale per sezioni significative sul torrente Bisagno ante e post aggiornamento dell'analisi idrologica.

4.2 Verifica della necessità di aggiornamento delle portate di piena del torrente Bisagno

Come descritto nel capitolo 3.1, la massima piena Q_T temibile lungo il corso del torrente Bisagno può essere valutata tramite la relazione

$$Q_T = Q_{indice} \cdot \left[0{,}619 - \frac{0{,}369}{0{,}319} \cdot (1 - e^{0{,}319 \cdot y}) \right]$$

I due diversi metodi utilizzabili per la determinazione di tale portata indice sono l'applicazione per via diretta e per via indiretta del metodo geomorfoclimatico.

Come descritto nel Piano di bacino *"Il confronto tra questi due metodi ha indicato una sostanziale concordanza di risultati, ma è stato infine privilegiato il metodo geomorfoclimatico indiretto, sia perché le stime risultano più cautelative sia perché tale procedimento che utilizza le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica risulta più semplice e robusto. (…)*

Si è pertanto proceduto verificando se e come l'aggiornamento dell'analisi idrologica descritto nel capitolo precedente possa modificare l'entità delle portate di piena di riferimento.

La valutazione della portata indice nella sezione di interesse può essere condotta *"utilizzando la pioggia indice, ossia il valore atteso della pioggia massima annuale. In questo caso, la trasformazione della*

pioggia indice in portata al colmo può essere condotta con il metodo cinematico, assumendo, quale portata indice, il valore critico in corrispondenza del tempo di equilibrio.

A tale scopo, le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica vengono espresse, per la generica stazione pluviometrica, tramite il modello scala invariante:

$$\mu_t = \mu_1 \cdot t^n$$

dove μ_t indica il valore atteso dell'altezza massima di precipitazione temibile in una durata temporale pari a t, μ_1 il corrispondente valore atteso per una pioggia di durata oraria e l'esponente n rappresenta la struttura della variabilità temporale della precipitazione."

Nel dettaglio, i parametri μ_1 (chiamato a_1 nel capitolo precedente) e n derivano dall'applicazione del modello lognormale dissipativo (cfr. capitolo 4.1.3).

"Utilizzando il metodo del Curve Number (CN) del Soil Conservation Service (SCS) formulato dal servizio tecnico del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, il corrispondente volume di piena R_t risulta:

$$R_t = \frac{\left(k_{A,t}^2 \cdot E_A[\mu_t] - I_a\right)^2}{\left(k_{A,t}^2 \cdot E_A[\mu_t] - I_a + S\right)}$$

dove $E_A[\mu_t]$ indica il valore atteso sull'area drenata A della pioggia massima annuale media nella durata t nel centro di scroscio; $k^2_{A,t}$ rappresenta il fattore di attenuazione (che dipende dall'area drenata A e dalla durata t dell'afflusso); S il massimo potenziale di ritenzione del terreno ed I_a il volume specifico di assorbimento iniziale, entrambi mediati sull'area drenata A. (…)

Per sviluppare questo metodo, bisogna altresì determinare la pioggia indice nel centro di scroscio. Tale valutazione può ancora condursi nelle ipotesi di conservazione dell'invarianza di scala (…). La determinazione di μ_{1A} e n_A viene quindi condotta, per ogni sezione di interesse, tramite una procedura geostatistica appoggiata sui valori locali, relativi ai valori stimati nei siti delle stazioni pluviometrici. Di conseguenza, si ha

$$E_A[\mu_t] = E_A[\mu_1] \cdot t^{E_A[n]} = \mu_{1A} \cdot t^{n_A}$$

dove μ_{1A} e n_A dipendono dalla specifica sezione idrografica."

Analizzando la struttura della formulazione del metodo SCS si ottiene la formulazione dell'altezza di pioggia utilizzata per definire la portata indice:

$$R_t = \frac{(h-I_a)^2}{(h-I_a+S)} = \frac{\left(k_{A,t}^2 \cdot E_A[\mu_t] - I_a\right)^2}{\left(k_{A,t}^2 \cdot E_A[\mu_t] - I_a + S\right)} \quad \rightarrow \quad h = k_{A,t}^2 \cdot E_A[\mu_t] = k_{A,t}^2 \cdot \mu_{1A} \cdot t^{n_A}$$

I parametri $k^2_{A,t}$, $E_A[\mu_1]$ e $E_A[n]$ sono forniti nel Piano di Bacino per alcune sezioni significative sul torrente Bisagno e, in particolare, per le sezioni A, D, I, M, Q e T analizzate nel capitolo 3.2. Noto il valore del fattore di attenuazione $k^2_{A,t}$, per ogni sezione è possibile ricavare la corrispondente durata t della pioggia indice risolvendo la relazione seguente, in cui A è la superficie del bacino [km²]:

$$k_{A,t}^2 = \left(1 + \varpi \cdot A^a \cdot t^{-b}\right)^{-c} = \left(1 + 0{,}02 \cdot A^{0{,}37} \cdot t^{-0{,}48}\right)^{-2}$$

È quindi possibile determinare, per tali sezioni, l'entità della precipitazione indice utilizzata per definire la portata indice. I risultati sono riassunti in Tabella 23.

Sezione asta principale	Nodo	Q_{indice} [m^3/s]	$k^2_{A,t}$ [-]	$E_A[\mu_1]$ [mm/ora^n]	$E_A[n]$ [-]	t [h]	h_{indice} [mm]
T. Bisagno monte t. Lentro	A	70,9	0,919	41,98	0,39	2,23	52,75
T. Bisagno valle t. Lentro	D	99,6	0,910	41,31	0,39	2,51	53,81
T. Bisagno valle rio Torbido	I	160,8	0,904	43,01	0,38	3,28	61,06
T. Bisagno valle t. Geirato	M	183,2	0,902	43,60	0,38	3,48	63,18
T. Bisagno monte t. Ferregiano	Q	211,8	0,903	44,17	0,38	4,10	68,19
T. Bisagno monte tratto tombato	T	227,1	0,902	44,17	0,37	4,30	68,36

Tabella 23 – Calcolo della pioggia indice per sezioni significative sul torrente Bisagno.

La pioggia indice definita in Tabella 23 e la portata indice corrispondente sono correlabili mediante una relazione che introduca le caratteristiche del bacino, ovvero tempo di pioggia, area e coefficiente di deflusso. In particolare, in analogia con il metodo utilizzato per la porzione di bacino compresa tra gli affluenti in sponda destra del Bisagno dal Veilino al Ruinà (capitolo 3.1), si è proceduto applicando la formula del metodo razionale per determinare il coefficiente di deflusso di ogni bacino analizzato. I calcoli sono stati eseguiti in funzione del tempo di pioggia t.

I coefficienti di deflusso così determinati sono stati utilizzati, supponendoli costanti, per determinare, noti i tempi di corrivazione dei bacini, le precipitazioni di progetto corrispondenti alle portate di piena indicate nel PdB (TR=200 anni, Tabella 5). I risultati sono riportati in Tabella 24.

Sezione asta principale	Nodo	Q_{indice} [m^3/s]	h_{indice} [mm]	c_d [-]	Q_{200} [m^3/s]	t_c [h]	h_{200} [mm]
T. Bisagno monte t. Lentro	A	70,9	52,75	0,48	406	1,82	**246,5**
T. Bisagno valle t. Lentro	D	99,6	53,81	0,47	570	2,07	**254,1**
T. Bisagno valle rio Torbido	I	160,8	61,06	0,51	921	2,77	**295,4**
T. Bisagno valle t. Geirato	M	183,2	63,18	0,52	1.049	2,97	**308,6**
T. Bisagno monte t. Ferregiano	Q	211,8	68,19	0,55	1.213	3,56	**339,0**
T. Bisagno monte tratto tombato	T	227,1	68,36	0,56	1.301	3,74	**340,5**

Tabella 24 – Calcolo delle altezze di pioggia per l'evento di ritorno duecentennale corrispondenti alle portate di piena riportate nel Piano di Bacino per sezioni significative sul torrente Bisagno.

Confrontando le precipitazioni corrispondenti alle portate di piena con tempo di ritorno duecentennale riportate nel PdB (Tabella 24) con quelle desunte dalle LSPP ante e post aggiornamento dell'analisi idrologica (Tabella 22) si evidenzia come **la determinazione delle portate di piena secondo il metodo dell'Autorità di Bacino corrisponda al considerare un evento di pioggia molto più gravoso rispetto a quello ottenibile mediante analisi delle curve di possibilità pluviometrica**.

Sezione asta principale	Nodo	h_{200} da LSPP PdB [mm]	$h_{200,aggiornamento}$ idrologia MEDIO [mm]	$h_{200,aggiornamento}$ idrologia MAX [mm]	h_{200} corrispondente a Qpiena [mm]
T. Bisagno monte t. Lentro	A	119,5	140,9	157,3	246,5
T. Bisagno valle t. Lentro	D	134,4	158,5	177,0	254,1
T. Bisagno valle rio Torbido	I	135,9	160,2	178,9	295,4
T. Bisagno valle t. Geirato	M	151,6	178,8	199,7	308,6
T. Bisagno monte t. Ferregiano	Q	173,1	204,1	228,0	339,0
T. Bisagno monte tratto tombato	T	176,1	207,6	231,9	340,5

Tabella 25 – Calcolo della pioggia per l'evento con tempo di ritorno duecentennale per sezioni significative sul torrente Bisagno ante e post aggiornamento dell'analisi idrologica; confronto con la pioggia corrispondente alla portata di piena riportata nel Piano di Bacino.

A conferma di quanto riscontrabile da tale confronto tra le altezze di precipitazione ottenute dall'aggiornamento idrologico e quelle che corrisponderebbero alle portate di piena definite nel PdB, si è proceduto anche a ritroso, calcolando quale dovrebbe essere il coefficiente di deflusso necessario per ottenere la portata di piena definita nel PdB considerando le diverse altezze di pioggia di riferimento.

Analogamente a quanto già descritto, il modello afflussi-deflussi assunto come riferimento è il metodo razionale. I risultati sono riportati in Tabella 26.

Nodo	Q_{200} da PdG [m^3/s]	h_{200} da LSPP PdB [mm]	c_d [-]	$h_{200,aggiornamento}$ idrologia medio [mm]	c_d [-]	$h_{200,aggiornamento}$ idrologia max [mm]	c_d [-]
A	406	119,5	**0,99**	140,9	**0,84**	157,3	**0,75**
D	570	134,4	**0,89**	158,5	**0,75**	177,0	**0,67**
I	921	135,9	**1,11**	160,2	**0,94**	178,9	**0,84**
M	1.049	151,6	**1,06**	178,8	**0,90**	199,7	**0,80**
Q	1.213	173,1	**1,07**	204,1	**0,91**	228,0	**0,81**
T	1.301	176,1	**1,08**	207,6	**0,92**	231,9	**0,82**

Tabella 26 – Calcolo della pioggia per l'evento con tempo di ritorno duecentennale per sezioni significative sul torrente Bisagno ante e post aggiornamento dell'analisi idrologica.

A riprova della non sussistenza di un legame diretto tra le altezze di pioggia (LSPP) e le portate di progetto definite dal Piano di Bacino, definite secondo una modalità di regionalizzazione e regressione statistica (almeno parzialmente) separata, se si volessero ottenere le portate di progetto partendo dai dati di pioggia "storici" sarebbe necessario imporre coefficienti di deflusso addirittura superiori a 1 (fisicamente impossibile su questa tipologia di bacino, non interessabile da significativi fenomeni di scioglimento di accumuli nevosi).

Con i dati pluviometrici aggiornati, riferiti all'incremento di precipitazione medio tra le stazioni esaminate (circa +18%), i coefficienti di deflusso necessari per ottenere le portate indicate nel PdB risulterebbero dell'ordine di 0,90 (corrispondente a un bacino contribuente pressoché impermeabile). Se si considera invece di maggiorare tutti gli afflussi per la percentuale di massimo incremento riscontrata sulle stazioni indagate (circa +32%), i coefficienti di deflusso sarebbero pari a circa 0,80 (valore relativamente elevato ma maggiormente ragionevole rispetto agli altri).

A titolo di confronto, in uno studio recente (2012) redatto dal Danish Hydraulic Institute (DHI), nel quale è stato eseguito il calcolo della portata di piena di riferimento per il torrente Bisagno a monte della confluenza con il torrente Fereggiano (sez. Q), è stato assunto un coefficiente di deflusso per il bacino sotteso pari a 0,75. In tale studio il calcolo della portata di piena per l'evento di ritorno duecentennale in tale studio è stato eseguito con applicazione del metodo razionale per la trasformazione afflussi-deflussi, utilizzando le precipitazioni calcolate mediante metodologia VAPI[6].

Alla luce di queste considerazioni si ritiene pertanto che **il valore della portata di piena di progetto con tempo di ritorno duecentennale fornito nel Piano di Bacino**, e nello specifico per le sezioni di riferimento per il presente progetto (sezioni M e T), anche a seguito dell'aggiornamento idrologico effettuato **sia ancora da ritenersi congruente e rappresentativo della massima piena temibile** in relazione alla frequenza considerata.

Tale congruenza, pur a fronte di sensibili incrementi delle precipitazioni intense di riferimento, è verosimilmente dovuta alle modalità di analisi statistica delle portate al colmo assunta nello studio su cui si basa il Piano di Bacino, che particolarmente per i tempi di ritorno più elevati risulta piuttosto cautelativo nella stima del valore di portata al colmo.

5 CONDIZIONE AL CONTORNO DI VALLE: DETERMINAZIONE DEL LIVELLO DI MARE

In linea generale, i parametri che devono essere presi in esame per individuare le condizioni al contorno di valle (sbocco a mare) allo sbocco della galleria sono il moto ondoso sottocosta, il livello di marea e la portata di piena defluente nelle gallerie scolmatrici (Fereggiano e Bisagno).

Il livello di mare di riferimento, che costituisce condizione al contorno di valle per le analisi effettuate in sede progettuale, è stato assunto pari a quello indicato nella Relazione Idrologica e Idraulica relativa alla galleria di adduzione principale facente parte del Progetto Definitivo dello scolmatore del torrente Bisagno – I lotto: Realizzazione delle opere per la messa in sicurezza idraulica del Torrente Fereggiano (e rivi Rovare e Noce) redatta nell'aprile 2014.

In tale relazione è riportato che *"Il livello del mare allo sbocco è fissato pari a **0,50 m s.m.** (in accordo con quanto già provato anche nelle modellazioni fisiche dell'opera di sbocco nell'ambito del PD2007)".*

In particolare, nella Relazione Idraulica relativa all'opera di sbocco a mare facente parte del PD2007 dello scolmatore del torrente Bisagno è riportato che: *"Si segnala come nelle prove su modello fisico effettuate sia stato assunto, come condizione al contorno di valle, un livello in vasca pari a 0.00 m s.m.m. per eventi meteomarini con tempo di ritorno minori o uguali a 10 anni. Per tempi di ritorno superiori è stato invece imposto un livello in vasca pari a +0.50 m (prototipo) per tenere in considerazione gli effetti di sopraelevazione del livello medio del mare (storm surges, eustatismo,…) che si verificano in occasione delle perturbazioni atmosferiche più intense."*

[6] CNR - Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche - Progetto VAPI Valutazione delle piene in Italia: "Rapporto sulla valutazione delle piene - Italia Nord Occidentale" - Estratto dal Rapporto Nazionale VAPI con aggiornamenti. A cura di Carlo De Michele e Renzo Rosso. Unità operativa 1.8 Milano 2001.

Per le finalità delle verifiche idrauliche si è considerata una portata allo sbocco (somma dei contributi di Bisagno e Fereggiano) pari a quella complessiva definita dal progetto definitivo del 2007, ovvero 520 m^3/s.

A seguito di specifica richiesta da parte del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, si è proceduto anche a verifiche integrative che considerino la contemporaneità perfetta tra tutti i colmi di piena del Bisagno e degli affluenti captati allo stato attuale delle opere e in futuro (Rovare e Noce), con riferimento alle portate massime assunte nei rispettivi progetti. Risulta pertanto una portata massima di verifica pari a 460 m^3/s proveniente dallo scolmatore del Bisagno, alla quale si aggiunge una portata di 136 m^3/s dallo scolmatore del Fereggiano (che include il contributo dei rii Rovare e Noce), per un totale di 596 m^3/s.

ALLEGATO 1 - Serie storiche dei dati di precipitazione massima di durata 1-24 ore

	VIGANEGO				
ANNO	**1**	**3**	**6**	**12**	**24**
1954	58	71,6	73,8	97,2	136,2
1955	21,4	32,8	47,6	93,6	160
1956	26	30	51	91	134
1957	43,2	66	81	119,2	150,8
1958	27,8	45	63,6	98,2	165
1959	36,6	81,6	108,8	130	158,6
1960	62,4	85,4	108,4	130,4	139
1962	28,4	51,2	66,2	107,6	135,8
1964	58,2	73	132,4	136	160,4
1965	79	88,8	89,4	107,8	165,8
1966	54,8	56,8	71	85,4	106
1967	26	57	87	143	154,8
1968	70	77	77	113	140
1969	40	95	118	135	145
1970	41,6	41,6	78	120	178
1971	39	82	103	113,8	122,8
1972	27	52,4	59,8	88,6	108
1973	73	96	135	147,4	148,6
1974	18	48	73	101	118
1976	40	80	100,5	112,9	123,2
1977	40	60	100	160	240
1978	23,6	52,8	65	92	113,8
1979	43	76,6	132,8	145,2	214,4
1980	25,8	44,2	77,8	122	136
1981	33,8	56,2	80,8	104,4	107,6
1982	32,6	40	69,6	119	170,8
1983	29,8	37,4	67	114	174
1984	62,6	88,8	90,4	90,4	127,2
1985	40,9	66,8	74,4	85	121,6
1986	32,8	55,8	79,8	84,8	132
1987	22,6	34,2	48	78,8	133
1988	31,8	54,8	66,8	94,6	124,2
1989	72,2	81,6	84,6	134,8	136,4
1991	64	160	175	188	212,8
1992	70	158	196	331,2	337
1993	55,8	96,8	129,4	171	244,4
1994	105	105,6	140,6	140,6	140,6
1995	31,4	81	94	113	150
1997	44,4	57,2	69,8	98,6	157,2
1998	23,2	37,6	55	69,8	70
2001	14,8	19,2	26,4	28,8	29,8
2003	47	87,8	115,8	129	161,6
2004	34,2	69,2	93,6	120,4	145,4

VIGANEGO

ANNO	1	3	6	12	24
2005	48,8	49,8	55,2	96,4	139
2006	33,6	42	64,2	89	123
2007	52,6	82,4	95,6	124,2	221,8
2008	61,2	70,6	92	121,2	192,2
2009	46	70,6	112,8	151	195,2
2010	83,4	164,2	170,2	178	180,2
2011	37,8	75	117,4	164,8	175
2012	51,80	69,6	93,8	115,2	137
2013	38,20	60,2	84,8	113,8	225,6
2014	70,00	90	117,2	149,2	218,6
2015	50,20	58,6	75,2	85,4	133,8
2016	25,20	43	66,8	99,2	149,4
2017	25,20	47,4	76,8	118,8	161

GENOVA UNIVERSITA'

ANNO	1	3	6	12	24
1932	34,8	41,6	43,4	63,8	88,6
1933	33,0	51,4	59,2	74,5	78,4
1934	78,0	102,8	103,0	104,6	164,4
1935	60,0	82,4	88,6	95,0	95,0
1936	39,4	46,4	47,2	68,6	99,0
1937	33,6	64,6	70,0	71,0	80,0
1938	28,0	43,2	63,0	79,4	99,4
1939	49,0	59,2	59,6	91,4	180,6
1940	80,0	105,6	106,6	122,2	122,4
1941	41,8	42,0	69,2	87,6	106,0
1942	54,6	120,0	153,4	166,2	203,0
1943	26,0	44,6	68,2	92,0	101,0
1944	34,6	50,2	67,0	94,8	98,0
1945	71,0	152,6	198,2	207,0	256,4
1946	29,2	47,0	49,2	49,2	49,2
1947	51,0	78,0	103,6	165,4	223,2
1948	53,6	74,6	75,2	75,2	83,2
1949	29,4	65,4	84,0	126,4	160,6
1950	27,2	41,8	50,2	62,4	66,4
1951	75,0	105,2	135,6	192,4	272,6
1952	27,8	44,2	47,0	61,2	79,2
1953	69,4	146,0	214,4	218,8	219,4
1954	22,8	60,8	69,0	69,2	82,8
1955	34,6	41,4	52,4	85,4	139,8
1956	38,2	53,0	60,6	73,2	102,4
1957	39,6	47,3	78,2	92,6	93,6
1958	29,0	31,4	40,0	66,6	111,4

	GENOVA UNIVERSITA'				
ANNO	**1**	**3**	**6**	**12**	**24**
1959	58,0	101,0	156,0	173,2	182,6
1960	48,6	69,4	79,4	100,4	121,0
1961	66,0	107,0	120,0	137,6	183,2
1962	25,2	41,0	53,2	78,6	121,2
1963	65,2	70,2	74,0	120,0	121,6
1964	54,0	91,0	112,8	118,8	127,6
1965	79,8	88,6	88,8	91,2	99,2
1966	33,2	35,0	43,2	59,4	85,0
1967	52,4	84,2	108,4	118,2	127,8
1968	28,6	44,0	63,8	118,6	136,2
1969	22,8	26,4	32,0	46,0	59,0
1970	76,0	166,0	201,0	256,0	414,8
1971	50,4	56,8	62,4	82,8	84,6
1972	43,2	89,8	97,2	135,6	183,0
1973	39,6	42,6	59,0	66,2	76,6
1974	37,8	51,8	52,8	75,2	90,6
1975	40,0	56,2	78,0	127,8	147,0
1976	53,5	76,1	99,2	111,3	124,1
1977	108,8	178,4	211,8	224,2	233,4
1979	51,8	80,4	135,6	138,4	176,4
1980	40,0	63,8	70,4	79,6	80,2
1981	85,4	113,0	133,8	168,2	173,0
1982	26,8	37,2	57,2	105,2	106,8
1983	27,4	65,8	76,0	99,4	108,6
1984	76,8	102,8	128,4	146,0	181,8
1985	25,6	46,0	71,0	91,8	121,0
1986	31,6	53,6	61,2	62,2	105,8
1987	95,6	187,4	187,4	187,4	188,6
1988	24,4	55,4	99,4	159,2	207,0
1989	33,0	33,8	40,0	50,2	71,2
1991	63,0	75,2	116,2	117,0	249,0
1992	71,0	173,4	229,0	426,0	451,0
1993	93,0	141,8	245,0	343,4	367,2
1995	27,8	55,0	85,0	122,8	133,6
1996	25,8	55,4	74,4	101,2	149,8
1997	100,0	135,0	138,4	148,8	174,6
1998	40,0	59,2	66,6	78,2	78,2
2006	22,8	36,4	66,2	94,4	152,6
2007	29,4	40,0	40,2	40,2	40,6
2009	30,0	48,0	54,0	76,0	101,4

GENOVA - CENTRO FUNZIONALE

ANNO	1	3	6	12	24
2003	23,4	42,4	55,8	61,0	84,0
2004	20,0	23,0	29,2	39,0	64,2
2005	38,4	41,4	48,2	61,8	81,8
2006	70,6	89,0	89,2	105,0	163,6
2007	24,2	32,6	33,8	47,6	82,6
2008	30,0	44,8	46,8	78,0	101,4
2009	29,0	43,6	60,2	67,8	90,8
2010	66,6	84,6	84,8	100,6	101,6
2011	55,8	106,0	134,8	167,8	217,8
2012	60,2	77,0	77,0	78,8	91,4
2013	43,2	44,8	44,8	63,8	91,4
2014	78,8	96,8	106,0	144,8	189,0
2015	75,6	130,2	149,6	159,2	198,8
2016	40,6	62,8	68,0	85,4	103,8
2017	38,2	39,6	39,6	51,2	64,8