

COLACEM S.P.A.

Sede legale: via della Vittorina, 50 – 06024 Gubbio

COMUNE DI GUBBIO (PG)

LOC. SAN MARCO

**CONCESSIONE MINERARIA PER MARNA DA CEMENTO
DENOMINATA “SAN MARCO”**

**RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA
FINALIZZATA ALLA VERIFICA DIMENSIONALE
DELLE VASCHE DI SEDIMENTAZIONE DELLE ACQUE METEORICHE**



Reg. n. 5061-A



AGT INGEGNERIA S.R.L., VIA DELLA PALLOTTA, 10/A - 06126 PERUGIA
TEL. 075/34029 - FAX 075/36378 - e-mail: a.badolato@agtingegneria.it
www.agtingegneria.it, C.F. e P. IVA 0271 926 0545

Ing. Antonella BADOLATO

Ing. Mauro CACCIAMANI

ing. Alessandro BERNI



Perugia, 13 Luglio 2026

Sommario

1	Introduzione	3
2	Valutazione degli idrogrammi di piena	4
2.1	Considerazioni generali	4
2.2	Caratteristiche del bacino idrografico	5
2.3	Definizione degli afflussi meteorici	7
2.4	Analisi regionale delle precipitazioni intense	14
2.5	Determinazione dello ietogramma di progetto	19
2.6	Stima delle perdite idrologiche mediante il metodo del Curve Number	19
2.7	La trasformazione afflussi – deflussi	21
2.7.1	Il metodo dell'idrogramma unitario istantaneo (IUH).....	21
2.8	Stima delle portate di progetto, analisi preliminari e scelta del modello idrologico.....	22
2.8.1	Relazioni matematiche	22
2.8.2	Modelli matematici.....	25
3	Implementazione del modello numerico con Hec-HMS	28
3.1	Idrogrammi di progetto	28
3.2	Schematizzazione del sistema di vasche volto alla decantazione del materiale solido trasportato in sospensione delle correnti di piena	29
4	Risultati delle analisi	32

1 Introduzione

Il progetto di efficientamento del sistema di decantazione delle acque meteoriche all'interno della miniera San Marco nasce dall'esigenza di eliminare gli episodi di non conformità dei valori di scarico – relativamente al parametro solidi sospesi totali – verificatisi, in alcune occasioni, a seguito di eventi meteorici di portata significativa.

Il sistema di decantazione è stato sottoposto a valutazione e riesame, da parte della Colacem S.p.A. attraverso i seguenti approfondimenti tecnici:

- ***Relazione Idrologico e idraulica finalizzata alla verifica dimensionale delle vasche di sedimentazione delle acque meteoriche*** – agosto 2021
- ***Relazione tecnica sugli interventi effettuati al fine del rispetto dei valori limite per eliminazione irregolarità scarico non conforme*** – 26 marzo 2026, redatta a seguito della richiesta della Regione Umbria - **DIREZIONE REGIONALE GOVERNO DEL TERRITORIO, AMBIENTE, PROTEZIONE CIVILE, RIQUALIFICAZIONE URBANA, COORDINAMENTO PNRR - Servizio Transizione ecologica, qualità dell'aria e mitigazione dei cambiamenti climatici** con la Determinazione Dirigenziale n. 1854 del 26/02/2026, avente ad oggetto: *D.Lgs. 152/2006, art. 130 comma 1, lett. a). Diffida per eliminazione irregolarità scarico non conforme nei confronti della ditta Colacem S.p.A.*, al punto 1 lettera b), di cui si riporta un estratto:

b) **Inviare entro il termine di 30 (trenta) giorni dal ricevimento del presente atto** alla Regione Umbria – Servizio Transizione ecologica, qualità dell'aria e mitigazione dei cambiamenti climatici e all'ARPA Umbria, Dipartimento Territoriale Umbria Nord, Distretto Gubbio-Città di Castello-Bastia, referto analitico dello scarico con la ricerca dei parametri di cui al rapporto di prova citato in premessa e relazione tecnica sugli interventi effettuati al fine del rispetto dei valori limite;

Al fine di eseguire una valutazione attendibile della prestazione del sistema di vasche, è stato redatto il presente aggiornamento della **Relazione Idrologica e Idraulica** del 2021, a firma della scrivente e degli ingg. Alessandro Berni e Mauro Cacciamani, a partire dagli ultimi dati pluviometrici disponibili ("Analisi regionale delle precipitazioni intense in Umbria", edito da Morlacchi Editori U.P. a cura di autori C. Saltalippi, R. Morbidelli, A. Flammini, T. Moramarco, Stefania Camici, M. Stelluti e A. Viterbo (2020)) per la verifica dimensionale delle vasche di sedimentazione nella configurazione di progetto.

2 Valutazione degli idrogrammi di piena

2.1 Considerazioni generali

L'analisi idrologica per $TR = 5$ e 10 anni per il bacino idrografico in esame è stata eseguita mediante una modellistica idrologica afflussi-deflussi considerando valida l'ipotesi che la portata defluente associata ad uno specifico tempo di ritorno sia determinata da una sollecitazione meteorica di pari probabilità di accadimento. In particolare, la trasformazione afflussi-deflussi, a meno del deflusso di base ritenuto trascurabile, viene descritta da un approccio idrologico costituito da due componenti in serie: un modello di infiltrazione basato sul metodo SCS-CN e un modello di formazione della piena basato a sull'idrogramma unitario istantaneo (IUH) adimensionale.

I passi per determinare l'idrogramma di piena di progetto per ogni assegnato tempo di ritorno sono:

- stima delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP);
- ragguaglio all'area delle LSPP;
- determinazione dello ietogramma di progetto: scelta della distribuzione temporale delle precipitazioni;
- stima della pioggia effettiva;
- stima della portata di progetto.

Di seguito verranno analizzati i seguenti elementi:

- a) **Definizione degli afflussi meteorici:** determinazione della relazione tra altezze e durata di pioggia di assegnato tempo di ritorno per il bacino idrografico in esame (LSPP) ed eventuale ragguaglio all'area;
- b) **Determinazione dello ietogramma di progetto:** scelta della distribuzione temporale delle precipitazioni;
- c) **Stima delle perdite idrologiche:** determinazione della quantità di precipitazione trattenuta dal terreno (perdite), con la conseguente determinazione della pioggia effettiva (o pioggia netta) che rappresenta il volume d'acqua che raggiunge per ruscellamento superficiale la rete di drenaggio fino alla sezione di chiusura, determinando l'evento di piena;
- d) **Trasformazione afflussi-deflussi:** schematizzazione della risposta del bacino idrografico alle sollecitazioni meteoriche, in funzione delle proprie caratteristiche fisiografiche e combinazione di tale risposta con la pioggia netta per stimare gli idrogrammi di piena.

2.2 Caratteristiche del bacino idrografico

Il bacino idrografico sotteso dalle vasche di sedimentazione della cava presenta una superficie complessiva di circa 0.6 Km².

Nelle figure seguenti si riportano rispettivamente le mappe del bacino in esame relative alla perimetrazione del bacino su foto aerea, al modello digitale del terreno (DTM), alle pendenze e al parametro concentrato di assorbimento, il cosiddetto Curve Number (descritto nei successivi paragrafi e desunto dallo specifico tematismo a scala regionale implementato dal CNR-IRPI di Perugia), elaborate con strumenti GIS.



Figura 2-1: perimetrazione del bacino idrografico su foto aerea.

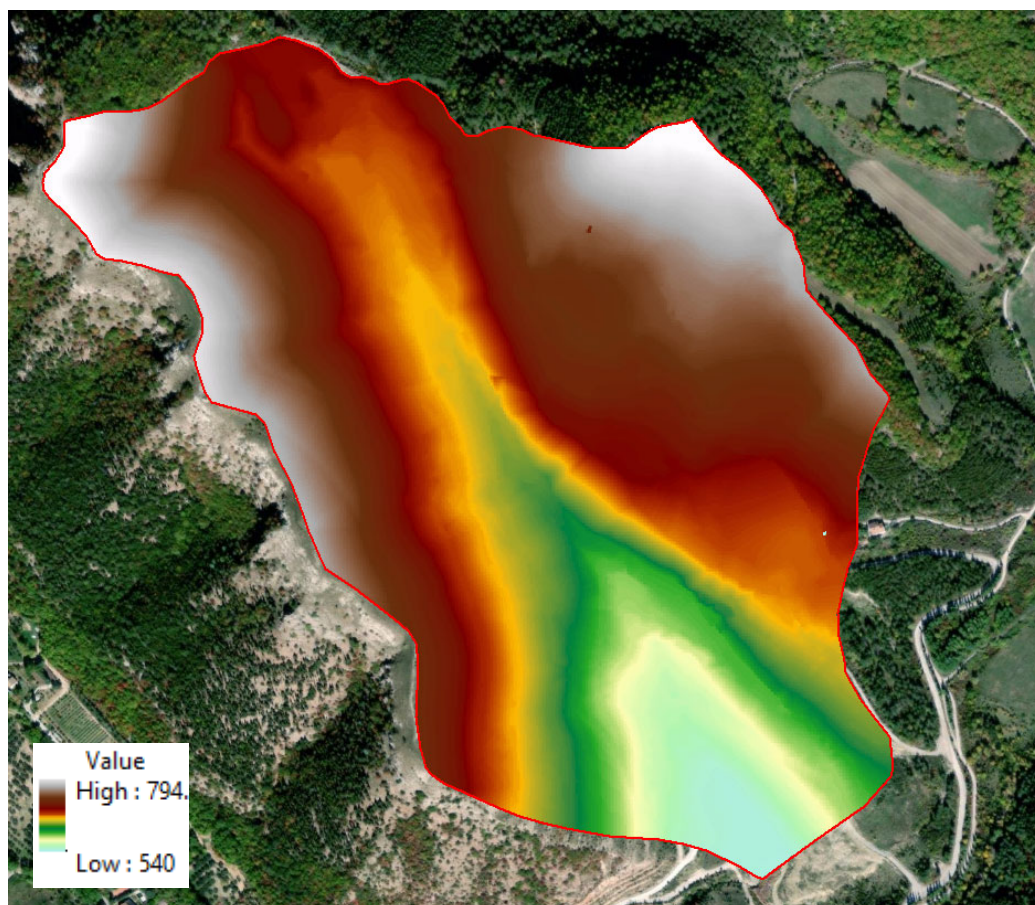


Figura 2-2: DTM bacino.

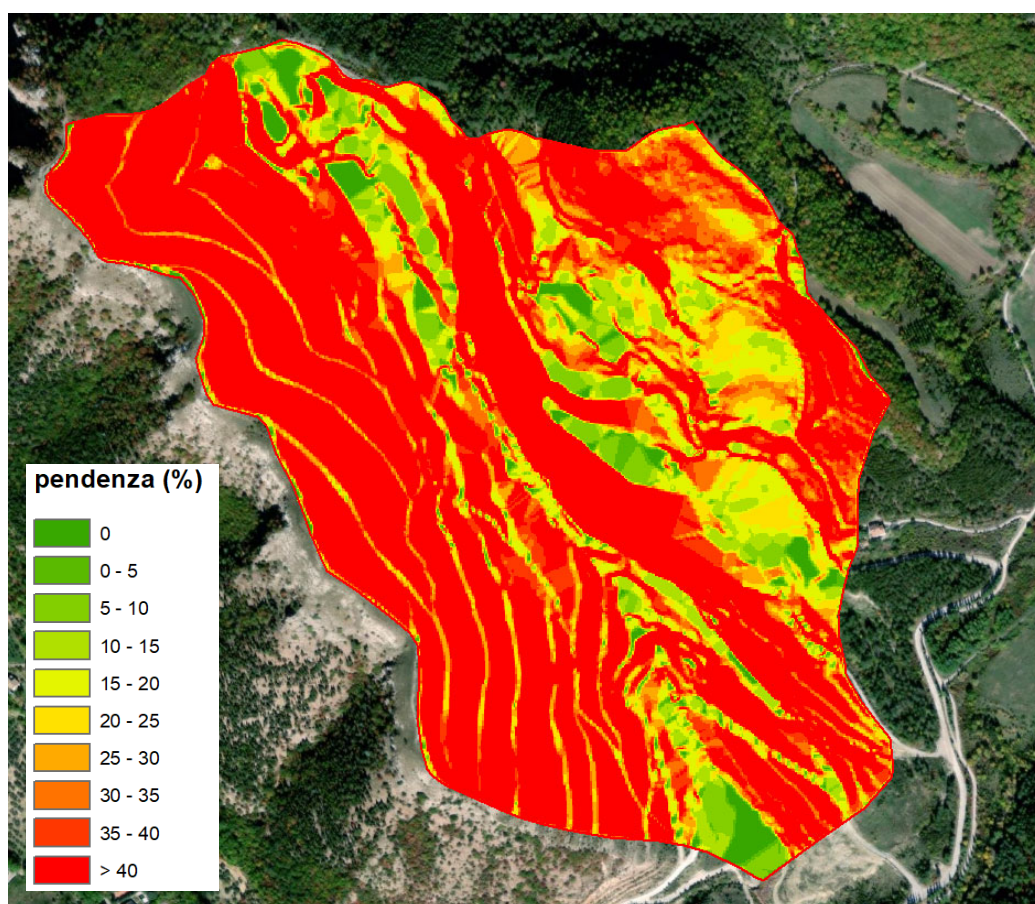


Figura 2-3: pendenze bacino.

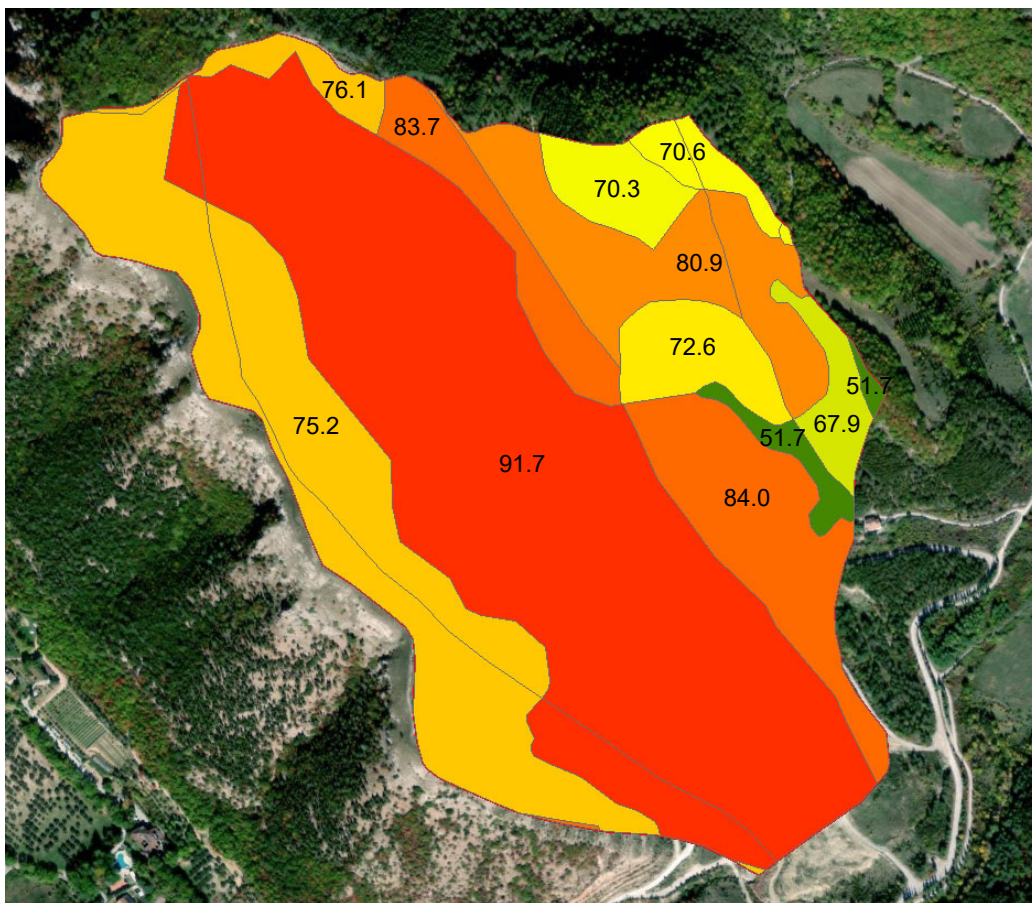


Figura 2-4: Curve Number bacino.

2.3 Definizione degli afflussi meteorici

La forzante meteorica sintetica utilizzata come input è schematizzata attraverso un ietogramma ad intensità costante nel tempo e nello spazio, la cui frequenza è stimata a partire dalle curve di possibilità pluviometrica ricavate dalla recente pubblicazione **“Analisi delle precipitazioni intense in Umbria”** (Morbidelli, Saltalippi, Cifrodelli, Flammini, Corradini, Brocca e Stelluti, Morlacchi Editore, 2016).

Dette curve sono espresse, per ciascun tempo di ritorno, nella classica equazione di forma monomia nella quale l'altezza di pioggia totale h [mm] è espressa in funzione della durata d [ore] dell'evento:

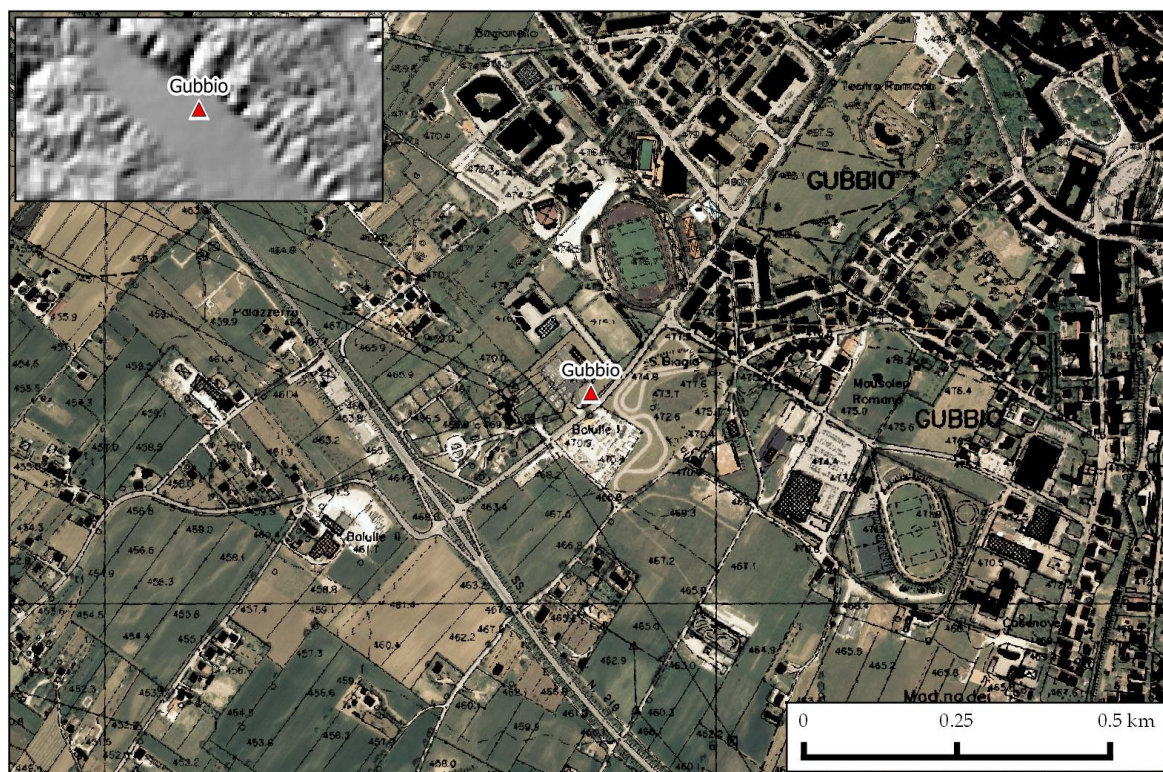
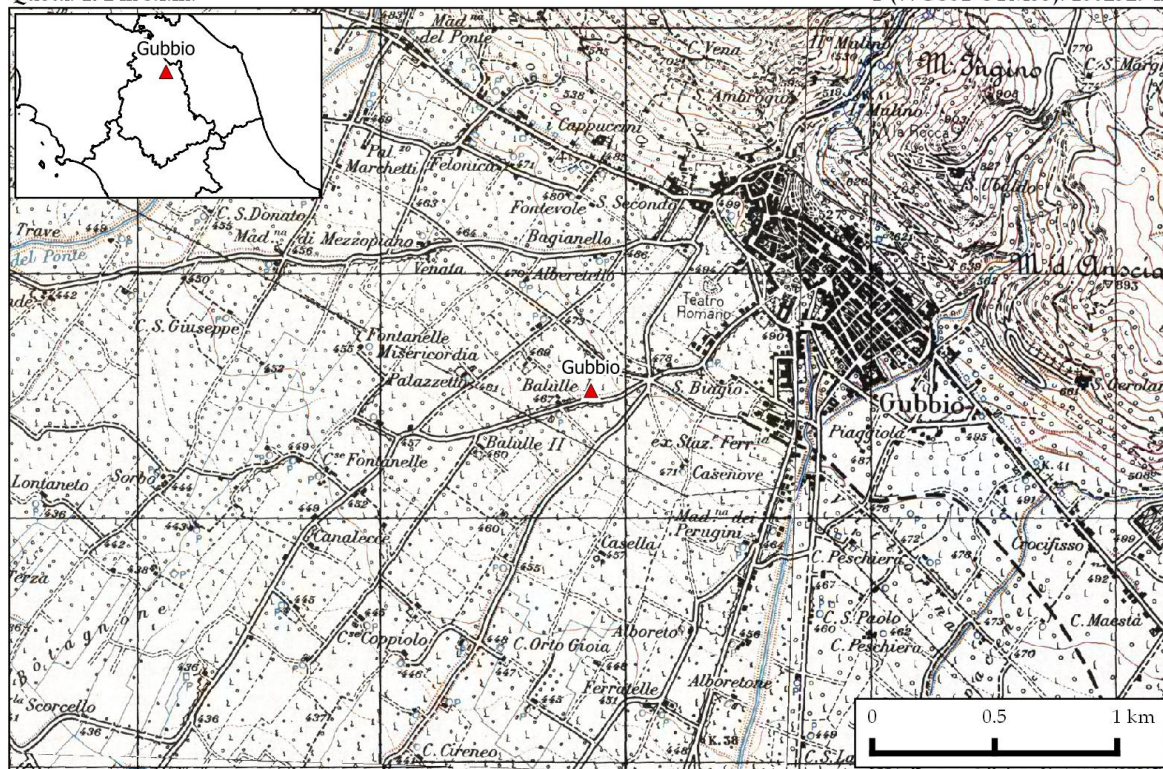
$$h = a \cdot d^b$$

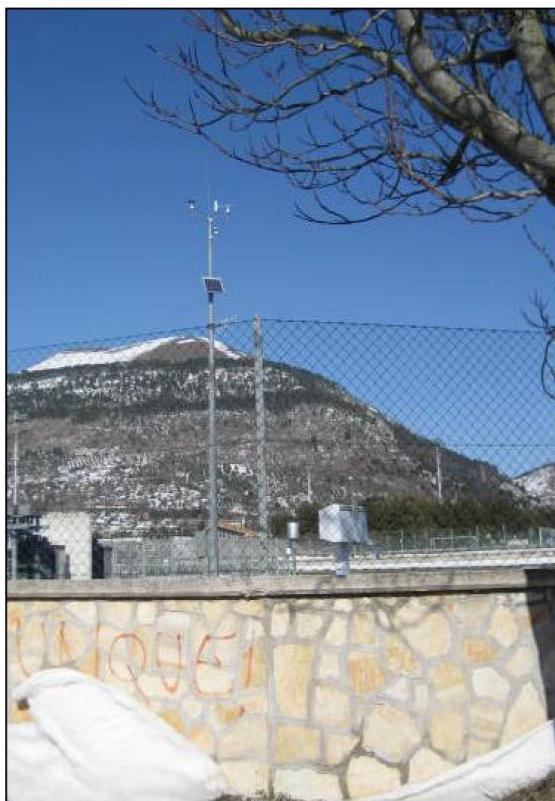
dove i parametri a e b sono ricavati dalla seguente scheda relativa alla stazione pluviometrica più vicina al bacino idrografico in esame, la stazione di Gubbio.

Stazione di GUBBIO

Comune: Gubbio
Quota: 471 m s.l.m.

Codice staz.: 30100
X (WGS84-UTM33): 302789 m
Y (WGS84-UTM33): 4802329 m





Stazione di GUBBIO - Spessori di pioggia massimi annuali, R_d (in mm)

ANNO	DURATA (minuti)						DURATA (ore)						
	5	10	15	20	30	40	1	3	6	12	24	36	48
1921											65		81
1922											49		64,4
1923											55,6		79,6
1924											45		72,8
1925											48		82,9
1926											56,4		95,6
1927											34,2		47,6
1928											55,7		89,7
1929							29	37	37,2	45	74,2		94,6
1930					19,5		30	45,5	45,5	80,8	83,4		109,8
1931					8,8		14	35,8	35,8		79,1		83,6
1932							14	33,2	33,2	46,6	57,2		66,2
1933			10,8		13,4		15,4	44,8	60	60	64,6		66
1934			17,2			29,4	29,4	46,4	46,6	57,4	71,4		85,2
1935							43,8	57,6	66,6	67,6	67,8		105
1936					11,8		21,2	26,2	26,6	39,4	59,8		81,6
1937		17,6					27,2	48,4	54,2	59,2	74		78
1938							23,8				33,4		52,4
1939							22	30,4	33	43,6	44,8		45,2
1940					16,4						48		55
1941											44,6		54,8
1942							31,8	33,8	46,6	48,4	57		59,2
1943											60,8		70,8
1944											58,2		87,1
1946											72		92
1947											55		79
1948											61		62
1949					13,6		20	29	32,2	48	58		61,4
1950											31,7		41,7
1951											61		74
1952											41		59,8
1953					10,5			26,4			30,8		50,8
1954							20	24,4	35	52,4	55	55	55
1955							22,6	41,5	60	60,2	68,8		68,8
1956					10,4	10,4	10,4	24	31,2	34,2	50,5		57,6
1957					14,6		15	26,5	36,5	47,5	61		61,2
1958											51		75,6

1959						15,6	21,4	25,4	36,5	42,5	51,5		68,2
1960											127,2		201,2
1961				14,6			25,5	38	50	63,4	<u>76</u>		76,4
1962							17,5	23,6	30,8	42,8	70		73
1963				10,2	14,8		28,5	31,5	38,6	43	52		69,2
1964											58,4		87,8
1965											115,4		150
1966	4,4			9,8	16,4						45,4		51,2
1968											68,2		93,7
1973						19,4					43,4		59,8
1974											40,4		44,8
1975						17,6	21,4	22	37	60	89,8		108,6
1976					21		25,4	39,4	65,4	70,4	72,4	72,4	72,4
1977			13		23		30	36,8	40	40	40		43
1978											54,2		59,6
1979	16,6						17,8	23,6	24,2	29,2	53,4		75,8
1980					22,8		29,8	44,2	52,2	64,2	66,8		82
1981					27,8		30,2	36,4	53	53	<u>59,8</u>	59,8	59,8
1982											77		102
1984					27,6		43,6	76,6	98,8	101	101	101	101
1985					14		20,2	21	25,4	37,6	44		58
1986					28		33,4	33,4	33,4	43,6	58,6		63,4
1987					33		35	40,6	47	51	<u>68,4</u>		79
1988					13		22	41	54,8	54,8	<u>62,6</u>		71,6
1989					16		20,4	60	82,8	85,8	91,4		97,6
1990					10,4		16	19,6	27,6	46,8	<u>78</u>		89
1991					23,8		27,4	44,4	44,4	44,4	47,8		58,2
1992	6,6	11,3	13,6	14,6	15,4	16,2	17,1	29,6	45,3	50,6	60,6	69,8	101,6
1993	6,7	11,6	14,6	15,4	16,1	18	23,7	34	48,4	62,6	64,4	86,2	89,2
1994	7,9	11	11,8	13,9	18,1	21,4	23,2	47,4	78,7	86,7	87	87,1	87,1
1995	8,3	11,4	14,2	15,1	17,5	17,5	18	28,7	38,5	40,9	51,1	51,2	51,2
1996	7	11,6	13,8	14,6	16,3	17,2	18	26,2	33,4	55,8	78,1	98,2	104
1997	6,2	9,5	11,1	12,9	17,3	18,5	21	29,2	37,9	55,6	76,7	97,9	99,9
1998	9	13,5	14,2	16,6	20	21,8	24,3	28,3	39,8	48,4	62,7	80,6	97,6
1999	10,7	14,9	20,3	24,1	28,7	31,4	31,8	38,9	56,9	70,2	70,4	70,4	71,7
2000	9,1	12,6	14,5	16,8	19,9	22,9	26	34,7	43,3	50,1	63	74,7	83
2001	8,6	14,9	21,1	26	34,6	41,3	44,8	47,4	47,4	47,4	51,5	55,7	60,8
2002	10,3	18,7	21,4	23,1	28,3	31,9	32	33,4	33,4	37,4	52,6	72,2	82,2
2003	9,8	15,6	20,1	26,5	36,8	50,3	69	90,6	102,6	103	106,8	106,8	106,8
2004	8,3	12	13,7	15,5	18,5	22,5	25,2	46,7	50,8	53,6	55,8	59,3	60,6

2005	6,4	9,1	10,1	10,1	10,2	11,6	11,8	28,4	44,2	56,4	91,8	107,2	110,8
2006	10	16,6	22,2	27	40,4	51	54,6	59	59,2	80,8	83,6	84	84,4
2007	18,4	27,4	37,2	40,6	43,4	45	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
2008	11,6	17	19,4	19,8	20	20	20,2	24,6	38	53,4	65,6	78,4	80,4
2009	9,8	17,4	20,8	23	26	30,2	30,8	30,8	30,8	45,6	51	68,8	81,4
2010	7	13,4	19,6	23,2	25,2	26,6	31,4	36,4	49,8	72,2	78	87,6	94
2011	9,2	16,2	21	23,4	28	31,2	31,4	31,4	31,4	35,2	37,2	37,2	40,2
2012	7,6	9,2	12,2	13,8	15	15,2	16,4	29,6	54,8	85,6	131,4	166,6	175
2013	11,2	14,2	15,8	19	24	27	31,2	60,6	66,6	72	104,2	124,6	130,6
2014	14,8	20,6	26,2	30	38,4	45	56,8	59,6	59,6	71,8	72,4	94	96,6
2015	7,6	12,6	13,8	14	18	18,6	18,8	24,2	28,8	42,4	54,2	60,4	62,8

Legenda:

	Ottenuto analizzando le registrazioni originali	99,9	Proveniente dal "Quaderno 7"
	Proveniente dagli Annali Idrologici	99,9	Ottenuto analizzando dati giornalieri
	Deduzione	99,9	Derivante da confronto tra fonti diverse

Stazione di GUBBIO - Note esplicative

Ente proprietario: Regione Umbria.

Stazione SPM20 in telemisura con risoluzione sensore pluviometrico di 0,2 mm, in funzione dal 16 febbraio 2012.

L'inizio delle osservazioni delle precedenti stazioni, distanti poche centinaia di metri dalla attuale, risale al 1921.

Analisi statistica effettuata per i campioni degli spessori massimi annuali di durata pari a: 5', 10', 15', 20', 30', 40', 1 ora, 3 ore, 6 ore, 12 ore, 24 ore, 36 ore e 48 ore.

Stazione di GUBBIO - Curve di Probabilità Pluviometrica

$R_d(T_r) = a d^{b'}$ (in mm) valida nell'intervallo di durate $0 < d \leq 1 \text{ ora}$

$R_d(T_r) = a d^b$ (in mm) valida nell'intervallo di durate $1 \text{ ora} \leq d \leq 48 \text{ ore}$

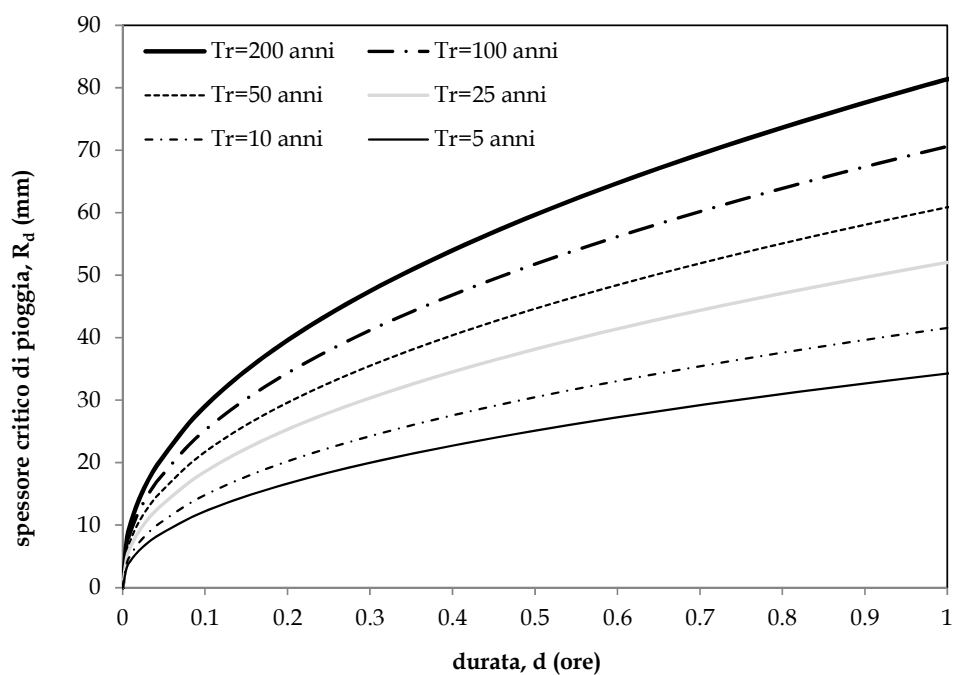
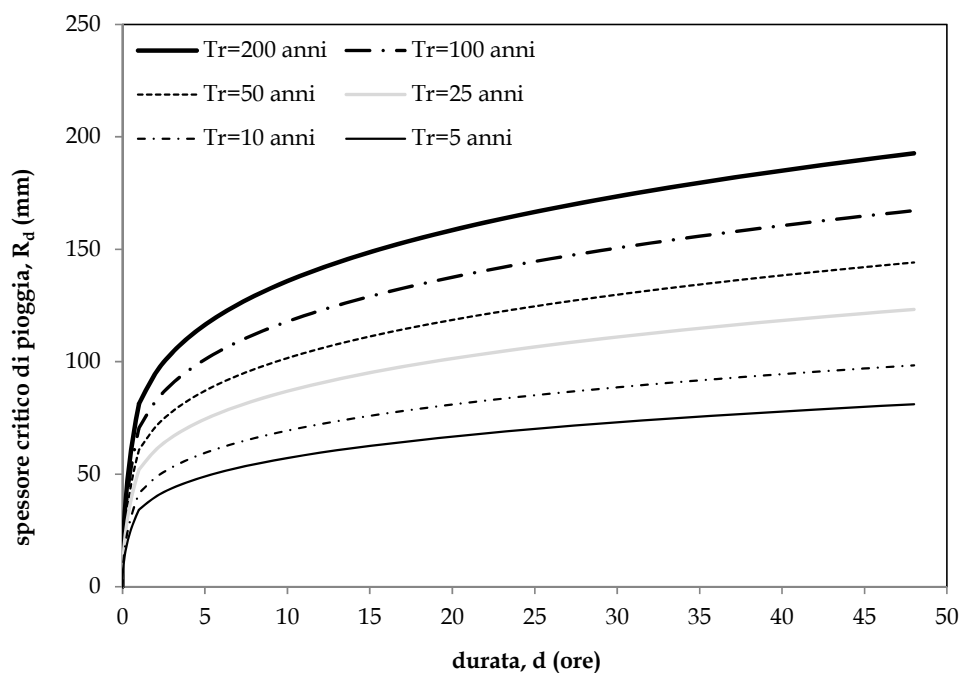
dove:

T_r (anni)	5	10	25	50	100	200
a	34,25	41,55	52,05	60,87	70,60	81,36
b'	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448
b	0,223	0,223	0,223	0,223	0,223	0,223

Stazione di GUBBIO - Spessori critici di pioggia (in mm)

T_r (anni)	DURATA (minuti)						DURATA (ore)						
	5	10	15	20	30	40	1	3	6	12	24	36	48
5	11,3	15,4	18,4	20,9	25,1	28,6	34,3	43,7	51,0	59,6	69,5	76,1	81,1
10	13,7	18,6	22,3	25,4	30,5	34,7	41,6	53,1	61,9	72,3	84,3	92,3	98,4
25	17,1	23,3	28,0	31,8	38,2	43,4	52,0	66,5	77,6	90,5	105,6	115,6	123,3
50	20,0	27,3	32,7	37,2	44,6	50,8	60,9	77,7	90,7	105,9	123,5	135,2	144,1
100	23,2	31,7	38,0	43,2	51,8	58,9	70,6	90,2	105,2	122,8	143,3	156,8	167,2
200	26,7	36,5	43,7	49,7	59,7	67,9	81,4	103,9	121,3	141,5	165,1	180,7	192,7

Stazione di GUBBIO - Andamenti grafici delle Curve di Probabilità Pluviometrica



I valori delle altezze di pioggia così calcolati sono validi, a rigore, solo per precipitazioni estreme puntuali, essendo stati calibrati a partire dai dati puntuali di pioggia (le LSPP sono tarate sulla base dei massimi annui misurati puntualmente in una determinata stazione pluviometrica).

All'aumentare dell'area interessata dalla precipitazione la probabilità di ottenere un'intensità media dell'evento estremo pari a quella puntuale diminuisce sensibilmente, soprattutto per eventi brevi che sono tendenzialmente più localizzati.

Nel presente caso, stante la modesta estensione del bacino, e comunque a favore di sicurezza, non è stata applicata alcuna riduzione all'area degli spessori di pioggia.

2.4 Analisi regionale delle precipitazioni intense

Si procede di seguito al riesame dei valori di altezza di pioggia determinati sulla base della pubblicazione "Analisi regionale delle precipitazioni intense in Umbria", edito da Morlacchi Editori U.P. a cura di autori C. Saltalippi, R. Morbidelli, A. Flammini, T. Moramarco, Stefania Camici, M. Stelluti e A. Viterbo (2020).

L'analisi regionale delle precipitazioni intense in Umbria costituisce infatti un metodo alternativo di stimare lo spessore di pioggia, per fissati valori di durata D e tempo di ritorno T_r , per un qualsiasi punto ricadente all'interno dei confini regionali. La procedura operativa prevede di localizzare il sito d'interesse nell'inquadramento regionale e di individuare i codici ID delle celle quadrate di lato 1 km interessati. Si estrapolano di seguito i dati per il calcolo della altezza di pioggia contenuti nella citata pubblicazione relativi all'ubicazione del sito oggetto d'intervento (Mappa 9):

ZONA	MAPPA	ID CELLA	mi24
1	9	3847	69,75
1	9	3848	71,14
1	9	3849	73,14
1	9	3969	69,65
1	9	3970	70,66
1	9	3971	72,23

Risultano interessate 6 celle, ad ognuna delle quali sono associati specifici valori di "zona" e un "valore indice $m_{i,24}$ " desumibili dalle tabelle contenute nella citata pubblicazione; a vantaggio di sicurezza si considera

$$m_{i,24 \text{ max}} = 73,14 \text{ mm.}$$

Il valore dello spessore di pioggia di fissata durata D e tempo di ritorno Tr, può essere ricavato dall'equazione

$$h(D, Tr) = m_{i,D} K_D(Tr) = m_{i,24} \left(\frac{D}{24}\right)^\alpha K_D(Tr)$$

dove D è la durata della pioggia (in ore), α è un coefficiente variabile in funzione della regione omogenea e $K_D(Tr)$ è il fattore di crescita che varia a seconda della regione omogenea, del tempo di ritorno, Tr (anni) e, solamente per la Zona 1, anche della durata della pioggia D. Il riepilogo dei valori assunti da α e $K_D(Tr)$ è mostrato nella seguente tabella

	ZONA 1		ZONA 2
α	0,27		0,26
K_{Tr}	1 ora $\leq D \leq 3$ ore	3 ore $< D \leq 48$ ore	1 ora $\leq D \leq 48$ ore
	$K_{Tr}=0,631+0,3809 \ln(Tr)$	$K_{Tr}=0,4898+0,4671 \ln(Tr)$	$K_{Tr}= 0,7483+0,2972 \ln(Tr)$

Pertanto si determinano di seguito le altezze di pioggia di progetto.

ZONA 1 – TR = 5 anni

Per altezze di pioggia non inferiori all'ora:

$$h(D) = 73,14 \cdot \left(\frac{D}{24}\right)^{0.27} \cdot 1.244035 \quad (\text{ZONA 1, } Tr = 5, \text{ per durate comprese tra 1 e 3 ore})$$

$$h(D) = 73,14 \cdot \left(\frac{D}{24}\right)^{0.27} \cdot 1.241568 \quad (\text{ZONA 1, } Tr = 5, \text{ per durate comprese tra 3 e 48 ore})$$

	D(ore)	H (mm)
H(1)	1	38,58
H(3)	3	51,90
H(6)	6	62,46
H(12)	12	75,31
H(24)	24	90,81
H(36)	36	101,31
H(48)	48	109,50

Altezze di pioggia per TR = 5 anni e stimate per durate superiori all'ora

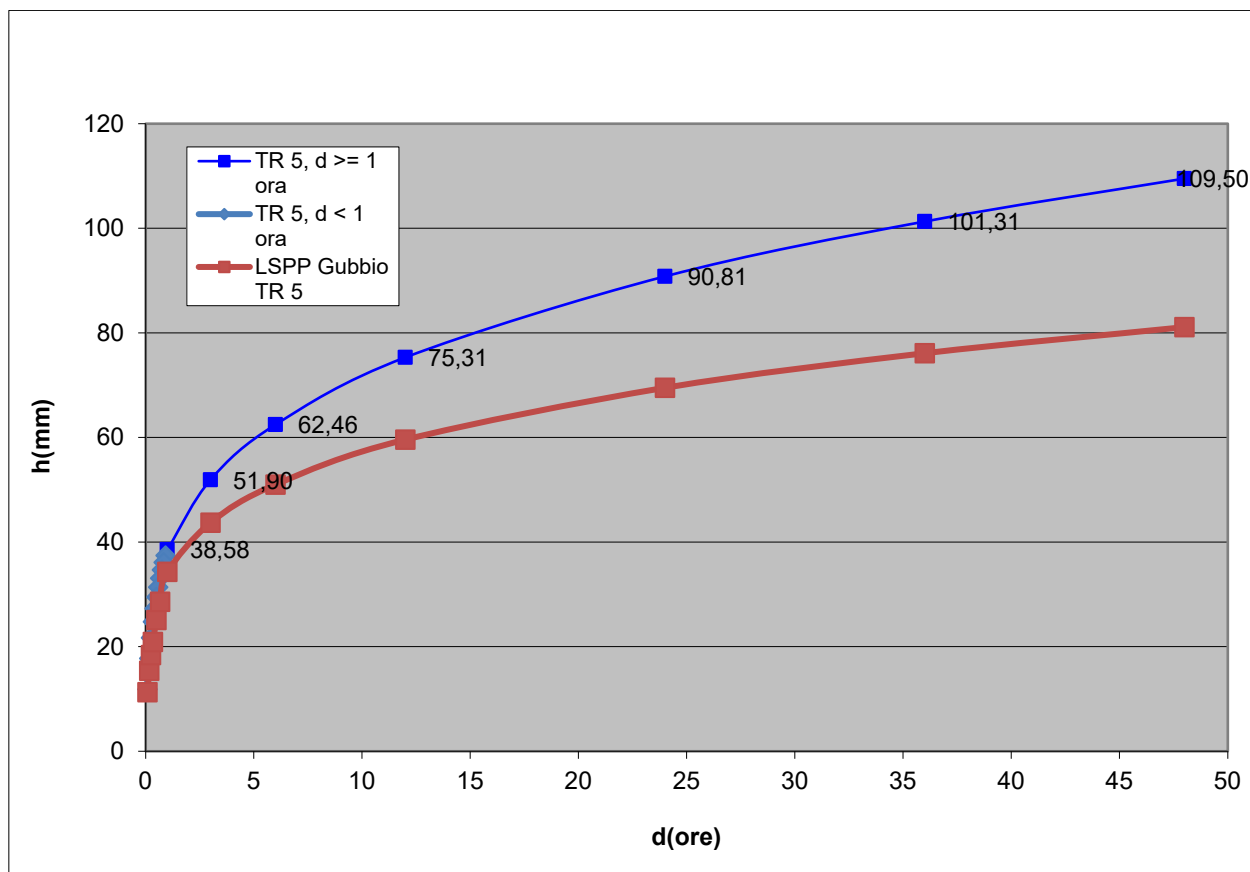
Le altezze di pioggia relative a durate inferiori all'ora saranno estrapolate mediante applicazione della relazione di Bell in funzione delle altezze di pioggia di durata oraria di seguito riportata nella formulazione con t, durata, espressa in minuti:

$$\frac{h_{t,T}}{h_{60,T}} = 0,54 \cdot t^{0,25} - 0,50$$

	t (min)	H (mm)
H(55)	55	37,44
H(50)	50	36,11
H(45)	45	34,67
H(40)	40	33,10
H(35)	35	31,38
H(30)	30	29,46
H(25)	25	27,29
H(20)	20	24,77
H(15)	15	21,71
H(10)	10	17,76
H(5)	5	11,86

Altezze di pioggia per TR = 5 anni e stimate per durate inferiori all'ora

Si riporta di seguito la rappresentazione grafica delle altezze di progetto determinate sovrapposta alla LSPP ricavata sulla base dei dati di pioggia relativi alla stazione pluviometrica di Gubbio per TR 5 anni (da “Analisi delle precipitazioni intense in Umbria” – Morbidelli, Saltalippi, Cifrodelli, Flammini, Corradini, Brocca e Stelluti – Morlacchi Editore, 2016)



ZONA 1 – TR = 10 anni

Per altezze di pioggia non inferiori all'ora:

$$h(D) = 73,14 \cdot \left(\frac{D}{24}\right)^{0.27} \cdot 1.508055 \quad (\text{ZONA 1, Tr} = 10, \text{ per durate comprese tra 1 e 3 ore})$$

$$h(D) = 73,14 \cdot \left(\frac{D}{24}\right)^{0.27} \cdot 1.565337 \quad (\text{ZONA 1, Tr} = 10, \text{ per durate comprese tra 3 e 48 ore})$$

H(1)	1	46,76
H(3)	3	62,91
H(6)	6	78,74
H(12)	12	94,95
H(24)	24	114,49
H(36)	36	127,73
H(48)	48	138,05

Altezze di pioggia per TR = 10 anni e stimate per durate superiori all'ora

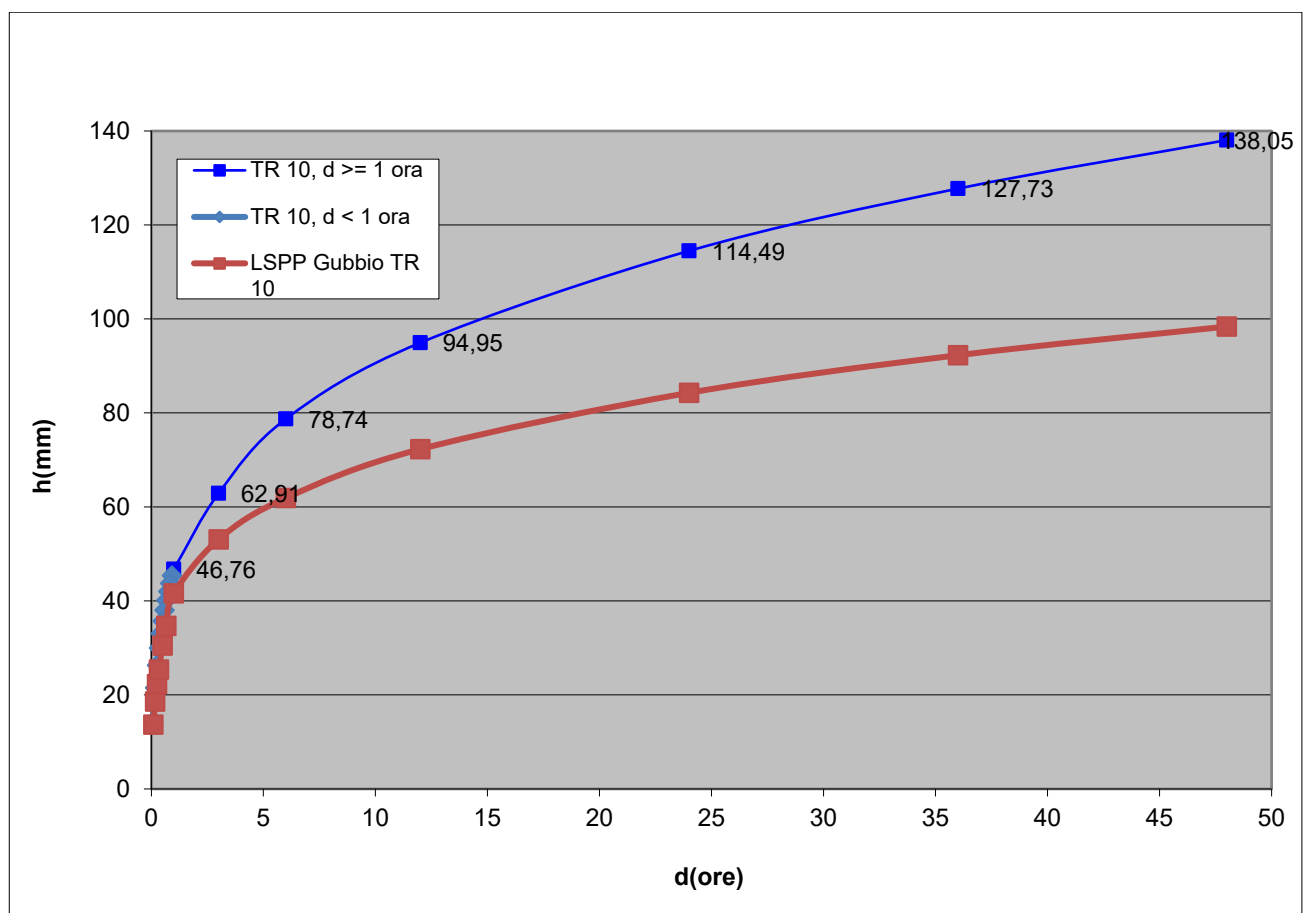
Le altezze di pioggia relative a durate inferiori all'ora saranno estrapolate mediante applicazione della relazione di Bell in funzione delle altezze di pioggia di durata oraria di seguito riportata nella formulazione con t, durata, espressa in minuti:

$$\frac{h_{t,T}}{h_{60,T}} = 0,54 \cdot t^{0.25} - 0,50$$

	t (min)	H (mm)
H(55)	55	45,39
H(50)	50	43,77
H(45)	45	42,02
H(40)	40	40,13
H(35)	35	38,04
H(30)	30	35,72
H(25)	25	33,08
H(20)	20	30,02
H(15)	15	26,31
H(10)	10	21,52
H(5)	5	14,38

Altezze di pioggia per TR = 10 anni e stimate per durate inferiori all'ora

Si riporta di seguito la rappresentazione grafica delle altezze di progetto determinate sovrapposta alla LSPP ricavata sulla base dei dati di pioggia relativi alla stazione pluviometrica di Gubbio per TR 10 anni (da “Analisi delle precipitazioni intense in Umbria” – Morbidelli, Saltalippi, Cifrodelli, Flammini, Corradini, Brocca e Stelluti – Morlacchi Editore, 2016)



Come desumibile dal confronto sopra riportato, gli spessori di pioggia ricavati dalla regionalizzazione risultano superiori, quindi cautelativi, rispetto a quelli forniti dalla singola stazione pluviometrica. Le analisi sono state quindi effettuate considerando le precipitazioni derivanti da regionalizzazione.

2.5 Determinazione dello ietogramma di progetto

Le LSPP forniscono, per una prefissata durata della pioggia, d , ed un tempo di ritorno, T_r , l'intensità media dell'evento senza però dare indicazioni sulla distribuzione temporale della precipitazione stessa nell'intervallo di tempo considerato.

A parità di tempo di ritorno, T_r , e di durata di pioggia, d , possono aversi infinite realizzazioni dello ietogramma a ciascuna delle quali sono associate differenti idrogrammi di piena, $Q(t)$. La sensibilità della risposta del bacino alla forma dello ietogramma è maggiore in bacini piccoli od in generale con ridotta capacità di invaso.

La distribuzione nel tempo dello spessore di pioggia fornito dalla LSPP (tipicamente in intervalli orari di intensità costante) può essere effettuata utilizzando diversi criteri, tra cui i più comunemente utilizzati sono:

- ietogrammi con intensità costante;
- ietogrammi con sequenza di spessori parziali di pioggia su intervalli costanti disposti in analogia alla LSPP;
- ietogrammi con sequenza di spessori parziali di pioggia su intervalli costanti disposti in analogia alla LSPP capovolta e ribaltata;
- ietogrammi a blocchi alterni (Alternating Block Method), in cui gli spessori di pioggia su intervalli costanti ricavati dalle LSPP sono ordinati con il valore massimo al centro dello ietogramma e i rimanenti valori disposti in maniera alternata a destra e sinistra dello stesso.

Per il presente studio è stato utilizzato, per la trasformazione afflussi deflussi, lo ietogramma con intensità costante. Come sarà spiegato in seguito, tali ietogrammi sono stati preliminarmente impiegati per la determinazione della durata critica del sistema idrologico in oggetto.

2.6 Stima delle perdite idrologiche mediante il metodo del Curve Number

La stima delle perdite idrologiche è stata effettuata con il metodo del Curve Number del SCS (*Soil Conservation Service*).

Questo metodo considera il deflusso superficiale come differenza fra le precipitazioni e le perdite, dove in queste ultime si inglobano, oltre alle perdite per infiltrazione, anche quelle per intercettazione da parte delle piante, quelle per accumulo sulle depressioni superficiali e quelle per l'imbibizione iniziale del terreno. L'ipotesi di base del metodo è che il rapporto fra il volume defluito ed il volume di pioggia depurato delle perdite iniziali rimanga,

in ogni istante, uguale al rapporto fra il volume infiltrato ed il volume massimo teorico delle perdite:

$$\frac{P_e}{P - I} = \frac{F_a}{S}$$

dove P_e è la precipitazione efficace per il deflusso, P la precipitazione lorda, I_a le perdite iniziali, F_a il volume specifico infiltrato ed S il volume specifico di saturazione del terreno. L'equazione di continuità si può riscrivere per questo modello come segue:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

nella quale le perdite iniziali (o *Initial Abstraction*) è possibile stimarle in funzione del volume specifico di saturazione tramite la relazione:

$$I_a = \beta \cdot S$$

dove si pone normalmente $\beta = 0.2$. Dalla combinazione delle due equazioni di continuità precedentemente scritte si ottiene l'espressione della precipitazione efficace:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

nella quale il volume specifico di saturazione S dipende dalla natura geologica del terreno e dall'uso del suolo, caratteristiche esprimibili in funzione del coefficiente Curve Number CN secondo la relazione:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

Il coefficiente CN può assumere valori compresi tra 0 (suolo completamente permeabile) e 100 (suolo completamente impermeabile) ed è stimabile tramite delle tabelle elaborate dalla US Soil Conservation Service a partire dalle caratteristiche geologiche, di uso del suolo e del livello di umidità antecedente l'inizio delle precipitazioni. Quest'ultimo fattore è schematizzabile in tre condizioni: terreno ben asciutto ($CN I$), terreno mediamente umido ($CN II$) e terreno molto umido ($CN III$).

Nel presente studio si è fatto riferimento a condizioni iniziali intermedie ($CN II$), con il parametro $CN II = 83.8$ calcolato per il bacino in esame sulla base dello specifico tematismo a scala regionale implementato dal CNR-IRPI di Perugia.

2.7 La trasformazione afflussi – deflussi

2.7.1 Il metodo dell'idrogramma unitario istantaneo (IUH)

Nel vasto panorama dei modelli di formazione dei deflussi, che si propongono di rappresentare matematicamente i processi idrologici che si manifestano in un bacino idrografico descrivendone il comportamento con un operatore che lega la funzione di distribuzione temporale delle piogge effettive (ingresso al sistema) ed il corrispondente idrogramma dei deflussi diretti (risposta del sistema), è stata scelta la metodologia basata sull'idrogramma unitario istantaneo (IUH). Il metodo si basa sulle ipotesi di linearità e stazionarietà del bacino ed effettua la combinazione tra pioggia in ingresso e IUH per il calcolo della portata diretta. In altre parole, la risposta $Q(t)$ ad una sollecitazione meteorica di intensità $p(t)$ variabile nel tempo, ma supposta costante su tutti i punti del bacino, è data dall'integrale di convoluzione:

$$Q(t) = \int_0^t p(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

dove $p(t)=A i(t)$ è la portata di afflusso meteorico al generico tempo t e la funzione $h(t)$, che prende il nome di IUH, è definita come l'idrogramma dei deflussi generato da un'ipotetica pioggia efficace di altezza unitaria ed intensità costante, distribuita uniformemente sul bacino, e caduta in un intervallo di tempo unitario (immissione di tipo impulsivo).

La funzione $h(t)$ può essere stimata mediante numerosi approcci, tra cui il metodo dell'invaso lineare, il metodo di Nash, il metodo geomorfologico oppure facendo ricorso all'idrogramma unitario del SCS.

2.7.1.1 L'idrogramma unitario del Soil Conservation Service (IUH-SCS)

L'idrogramma SCS è un idrogramma adimensionale definito dal SCS in base all'analisi di idrogrammi di piena in uscita dalla sezione di chiusura di numerosi bacini idrografici strumentati, di dimensioni grandi e piccole. Esso ha un vasto campo di applicazioni pratiche nel campo delle trasformazioni afflussi deflussi per la sua semplicità d'uso e per la sua generalità. Questo IUH presenta il 37.5% del suo volume prima dell'istante di picco; inoltre, i valori della portata di picco e dell'istante T_p sono stati ricavati adottando un modello semplificato di idrogramma triangolare di base $2.67 T_p$ (Figura 2-5).

Per la definizione dell'idrogramma unitario adimensionale del SCS per è necessario specificare il tempo di ritardo T_1 del bacino idrografico, che può essere valutato separatamente mediante relazioni empiriche valide per l'area in esame oppure, in assenza di esse, a partire dal tempo di corrivazione secondo la relazione:

$$T_l = \frac{3}{5}T_c$$

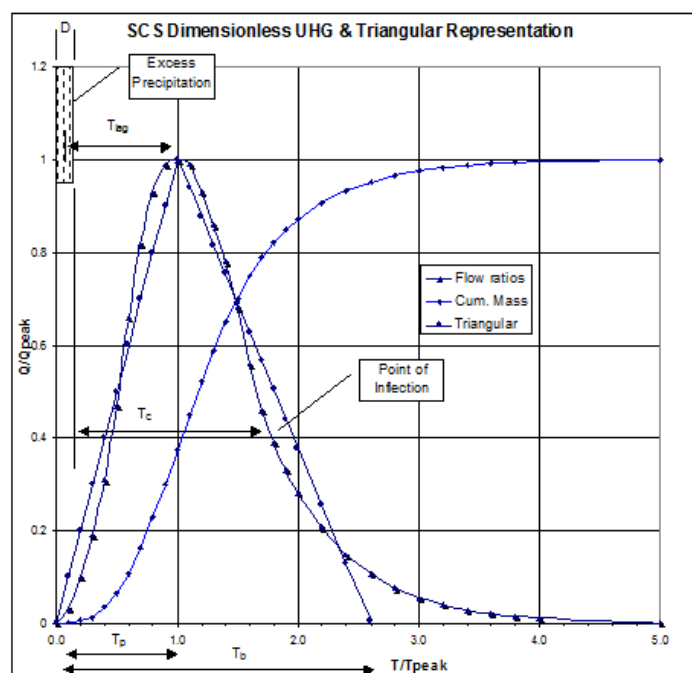


Figura 2-5: IUH-SC

2.8 Stima delle portate di progetto, analisi preliminari e scelta del modello idrologico

La scelta del tipo di schematizzazione per rappresentare la risposta di un bacino idrografico sollecitato da un evento meteorico è condizionata sia dall'obiettivo dell'analisi che si vuole effettuare sia dalla disponibilità dei dati. Le metodologie comunemente utilizzate per rappresentare la trasformazione afflussi-deflussi possono essere distinte in relazioni matematiche e modelli matematici. Le relazioni matematiche, nelle quali il tempo non compare come variabile, sono comunemente usate quando non è necessario descrivere l'andamento temporale delle grandezze. I modelli matematici, viceversa, si usano quando le quantità in gioco sono funzioni del tempo e non è possibile trascurare l'influenza esercitata sui valori di una grandezza da quelli che la stessa ha assunto in precedenza.

2.8.1 Relazioni matematiche

Le relazioni matematiche forniscono solo alcune caratteristiche dell'idrogramma di progetto quali l'istante della portata al colmo, la portata al colmo o la durata. I vari metodi utilizzati nella pratica idrologica per la schematizzazione della trasformazione afflussi-deflussi si basano su alcune ipotesi semplificative che sono quelle su cui si fonda il metodo razionale e, in particolare, sono:

- per un fissato tempo di ritorno il massimo della portata al colmo di piena è prodotto dall'evento di pioggia, uniforme nello spazio e nel tempo, ricavato dalla

corrispondente curva di possibilità pluviometrica ed avente una durata uguale al tempo di corrivazione del bacino;

- il picco dell'idrogramma di piena si osserva all'istante in cui cessa la pioggia;
- il picco di piena ha il medesimo tempo di ritorno della precipitazione che lo ha generato;
- la formazione della piena nel bacino ed il suo trasferimento lungo il reticolo idrografico avvengono senza la formazione di significativi invasi.

Tra le varie relazioni matematiche, si ricorda quella di Ghirardelli che assume l'idrogramma di piena di forma triangolare, con tempo di risalita e di discesa pari al tempo di corrivazione. Il valore della portata al colmo è quindi dato da:

$$Q_c = \frac{1}{3.6} \frac{EA}{T_c}$$

dove E è la pioggia areale netta, denominata anche eccesso di pioggia, espressa in mm; T_c è il tempo di corrivazione, espresso in ore; e A è la superficie del bacino espressa in km².

Nel caso di bacini idrografici strumentati, se si dispone delle osservazioni relative ad alcuni idrogrammi di pienasalienti, il calcolo del tempo di corrivazione, T_c , può essere effettuato mediante lo ietogramma di pioggia effettiva e l'idrogramma di deflusso diretto. In particolare, i metodi di stima più ricorrenti per T_c sono (Singh, 1988):

- il tempo che intercorre tra il centroide della pioggia effettiva e il punto di inflessione del ramo decrescente dell'idrogramma di portata diretta;
- il tempo tra la fine della pioggia effettiva e il punto di inflessione del ramo decrescente dell'idrogramma di portata diretta.

Per bacini idrografici non strumentati, invece, la stima del tempo di corrivazione dipende da relazioni empiriche che esprimono il legame tra T_c ed alcune grandezze caratteristiche del bacino di facile determinazione. Tra le relazioni empiriche maggiormente utilizzate, ricordiamo la formula di Giandotti (1934), ricavata attraverso dati relativi a diversi bacini italiani (Dora Baltea, Trebbia, Taro, Panaro, Reno Tevere, Arno, Po), che stima T_c in ore come:

$$T_c = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{0.8H^{0.5}}$$

con A area del bacino in km², L lunghezza dell'asta fluviale principale in km e H altezza media del bacino rispetto alla sezione di chiusura espressa in metri. L'altezza media del bacino può essere stimata mediante un modello digitale del terreno.

Altre formule disponibili per la stima del tempo di corrivazione e ottenute su bacini aventi diverse caratteristiche fisiografiche sono quelle di Kirpich, Viparelli, Pezzoli, Aronica e Paltrinieri, Watt & Chow, Chow, NCRS-Lag method.

- **Kirpich**, analizzando sei piccoli bacini americani di area compresa tra 0.0051 e 0.433 Km², ha ricavato la seguente relazione, successivamente corretta da Rowe e Thomas:

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{L}{\sqrt{i_a}} \right)^{0.77}$$

in cui t_c è espresso in ore, e L è la lunghezza dell'asta principale, a partire dallo spartiacque, espressa in metri e i_a è la sua pendenza.

- **Viparelli** calcola il tempo di corrivazione t_c come il rapporto tra la lunghezza del percorso idraulicamente più lungo che deve seguire la particella d'acqua per raggiungere la sezione di chiusura e stabilire una velocità media di trasferimento V della particella nel suddetto percorso:

$$t_c = \frac{L}{V}$$

e suggerisce di utilizzare valori della velocità V caratteristica per correnti di piena variabili tra 1 e 1.3 m/s, specie per corsi d'acqua pedemontani.

- **Pezzoli** propone invece la seguente espressione del tempo di corrivazione, dedotta da misure su piccoli bacini piemontesi:

$$t_c = 0.055 \frac{L}{\sqrt{i_a}}$$

in cui t_c è espresso in ore, L è la lunghezza dell'asta principale espressa in Km e i_a è la pendenza media (m/m) dell'asta principale.

- Una formula analoga è quella di **Watt e Chow**, ottenuta utilizzando dati relativi a 44 bacini canadesi di area compresa tra 0.01 e 5840 Km² e caratterizzati da valori della pendenza i_a variabili tra 0.00121 e 0.0978:

$$t_L = a \left(\frac{L}{\sqrt{i_a}} \right)^b$$

in cui t_L è espresso in ore, L è la lunghezza dell'asta principale espressa in m, e le costanti a e b assumono rispettivamente il valore 0.000326 e 0.79.

- **Chow** ha proposto anche la stessa formula con i coefficienti $a=0.00116$ e $b=0.64$, studiando venti piccoli bacini americani di superficie variabile tra 0.0051 e 18.5 Km².
- la formula del **NCRS – Lag method** propone, per bacini con superficie compresa tra 0.004 e 8.1 km²:

$$t_c = \frac{l^{0.8} (S + 1)^{0.7}}{0.6 \cdot 1900 \sqrt{i_v}}$$

in cui t_c è espresso in ore, l è la lunghezza idraulica del bacino in piedi, S è la ritenzione potenziale espressa in mm e i_v è la pendenza media dei versanti in percentuale.

2.8.2 Modelli matematici

La modellistica idrologica si prefigge di creare modelli matematici di tipo afflussi-deflussi, capaci di riprodurre l'andamento della portata in una o più sezioni del reticolo idrografico di un bacino, in funzione della distribuzione sia spaziale che temporale delle piogge. In letteratura sono descritti differenti tipi di modelli idrologici, che possono essere classificati in funzione della complessità della trattazione del problema (Maione, 1977). Tra questi, i più appropriati per gli scopi del presente studio sono i cosiddetti modelli di piena di tipo concettuale che utilizzano rappresentazioni semplificate dei processi fisici in gioco, che vengono comunque esplicitamente presi in considerazione. Inoltre, tali modelli incorporano parametri che sono fisicamente basati riducendo così l'arbitrarietà in fase di calibrazione del modello stesso. In particolare, essi rappresentano con semplicità le perdite, mentre cercano di descrivere in modo più dettagliato la trasformazione della pioggia netta in portata diretta. Quest'ultima viene assunta pari alla portata totale, poiché in eventi salienti di piena il deflusso di base è tipicamente trascurabile.

Possono essere sviluppati modelli aventi diversi gradi di complessità, da particolarmente semplici a molto dettagliati; tuttavia, per scopi di tipo ingegneristico, è consigliabile l'uso di modelli che rispondano ad alcune particolari esigenze, quali:

- la dipendenza da un numero limitato di parametri, che ne consenta il controllo in fase di calibrazione;
- la semplicità di schematizzazione dei processi fisici, che permetta un'agevole implementazione;
- la sensibilità sufficientemente limitata alla variabilità dei parametri stessi.

I **modelli semi-distribuiti** consentono di soddisfare l'esigenza di impiegare un numero limitato di parametri che ne permetta il controllo in fase di calibrazione e nello stesso tempo utilizzano l'informazione geomorfologica distribuita, la variabilità spaziale delle piogge e delle caratteristiche del suolo, che costituiscono gli aspetti fondamentali nell'analisi della risposta idrologica a scala di bacino. I modelli semi-distribuiti si possono, quindi, considerare come una valida alternativa sia ai modelli a parametri concentrati che incorporano un numero ridotto di parametri a scapito della descrizione dei processi fisici, sia ai modelli distribuiti che, pur effettuando una schematizzazione dettagliata dei fenomeni, restano vincolati a troppi parametri. La scelta è stata quindi dettata dalla necessità di utilizzare un numero limitato di parametri, da stimare attraverso pochi eventi di piena deducibili da bacini "simili" appartenenti alla stessa area geografica, e che sia in grado di fornire gli idrogrammi di piena in qualsiasi sezione del tratto fluviale investigato.

La Figura 2-6 illustra in maniera schematica e concettuale gli elementi del modello e le loro connessioni per il j-esimo segmento fluviale.

Il modello idrologico scelto è in sintesi un **modello di simulazione dell'evento critico** avente le seguenti caratteristiche:

- dati di pioggia da LSPP aggiornate (pubblicazione 2016);
- durata critica determinata con procedimento iterativo in modo da massimizzare il valore della portata al colmo nella sezione di chiusura di interesse;
- ietogramma costante;
- stima dell'infiltrazione mediante metodo SCS-CN;
- trasformazione afflussi deflussi basata, in questo caso, sull'IUH del SCS per il bacino in esame (con tempo di ritardo valutato a partire dal tempo di corrivazione), non essendo presenti interbacini.

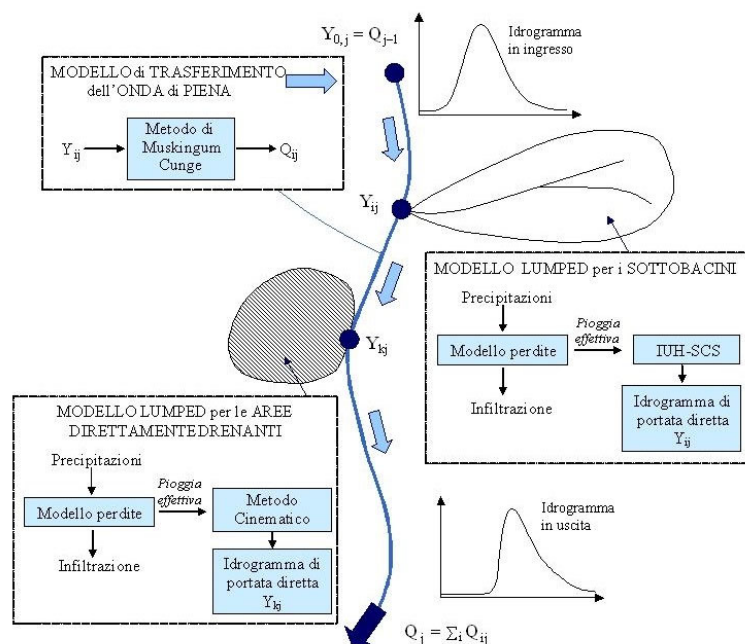


Figura 2-6: Diagramma schematico degli elementi del modello idrologico e delle loro connessioni.

In Tabella 2-1 sono riportati i valori dei parametri caratteristici per il calcolo del tempo di corrivazione t_c : area del bacino S , lunghezza dell'asta principale L , L_b lunghezza idraulica del bacino, h_m altezza media su sezione di chiusura del bacino, H_{max} quota massima del bacino, H_{min} quota minima del bacino, $CN(II)$, i_v pendenza media dei versanti, i pendenza media¹ dell'asta principale, ritenzione potenziale.

Nella Tabella 2-2 è indicato invece il valore del tempo di corrivazione t_c stimato con varie formulazioni disponibili in letteratura e precedentemente descritte, il valore medio e il tempo di ritardo Tr (il cosiddetto "Lag").

Tabella 2-1: parametri caratteristici per il calcolo del tempo di corrivazione

S	L	L_b	h_m	H_{max}	H_{min}	CN (II)	i_v	i	S
[Km ²]	[Km]	[Km]	[m]	[ms.l.m.]	[ms.l.m.]		[%]	[%]	[mm]
0.6	0.9	1.18	128.4	794.0	546.0	83.8	44.9	9.99	1.93

Tabella 2-2: indicazione per ciascun sottobacino del tempo di corrivazione calcolato con le predette formule, di quello medio nonché del tempo di ritardo Tr

t_c [ore]							Tr [min]
Kirpich	Viparelli	Pezzoli	Watt	Chow	NCRS	media	
-	0.25	0.16	0.29	0.32	0.21	0.24	9

¹ Calcolata come media armonica delle radici delle pendenze medie dei sottotratti che la compongono, pesate per la lunghezza dei rispettivi sottotratti. (vedi Da Deppo, Datei, Salandin *Sistemazione dei corsi d'acqua Quarta edizione*, Libreria Internazionale Cortina, Padova, 2002, pag 178) La media armonica è l'inverso della media aritmetica degli inversi:

$$i^{0.5} = \frac{\sum_j L_j}{\sum_j L_j \cdot i_j^{-0.5}}$$

3 Implementazione del modello numerico con Hec-HMS

Nel presente studio è stato implementato un modello numerico mediante il software americano HEC-HMS ver. 4.6 (Figura 3-1) nel quale, oltre al bacino idrografico, sono state schematizzate anche le vasche in successione, nella configurazione di progetto, volte alla decantazione del materiale solido trasportato in sospensione delle correnti di piena.

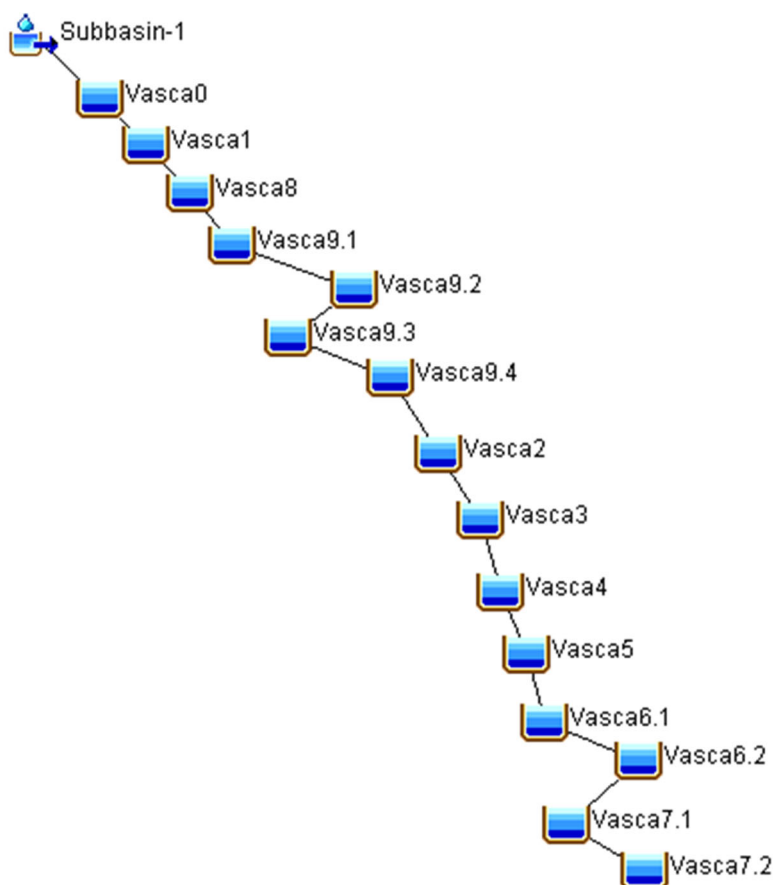


Figura 3-1: Modello idrologico implementato mediante il software HEC-HMS

3.1 Idrogrammi di progetto

Gli scenari idrologici investigati sono relativi ai tempi di ritorno 5 e 10 anni, mentre le durate di pioggia analizzate sono pari a 15', 30', 45', 1 ora, 1.5 ore.

Di seguito si riportano gli idrogrammi di piena calcolati con il descritto modello idrologico (Figura 3-2 e Figura 3-3), afferenti al sistema di vasche.

Si osserva che la durata critica di precipitazione tale da massimizzare la portata al colmo generata dal bacino è pari a 45 minuti per TR = 5 e 10 anni.

I valori di portata di picco ed i volumi dell'onda di piena risultano pari a:

- TR = 5 anni, d = 45 minuti: $Q_{\text{picco}} = 3.39 \text{ mc/s}$, $V_{\text{onda piena}} = 4990 \text{ mc}$;
- TR = 10 anni, d = 45 minuti: $Q_{\text{picco}} = 4.84 \text{ mc/s}$, $V_{\text{onda piena}} = 7620 \text{ mc}$;

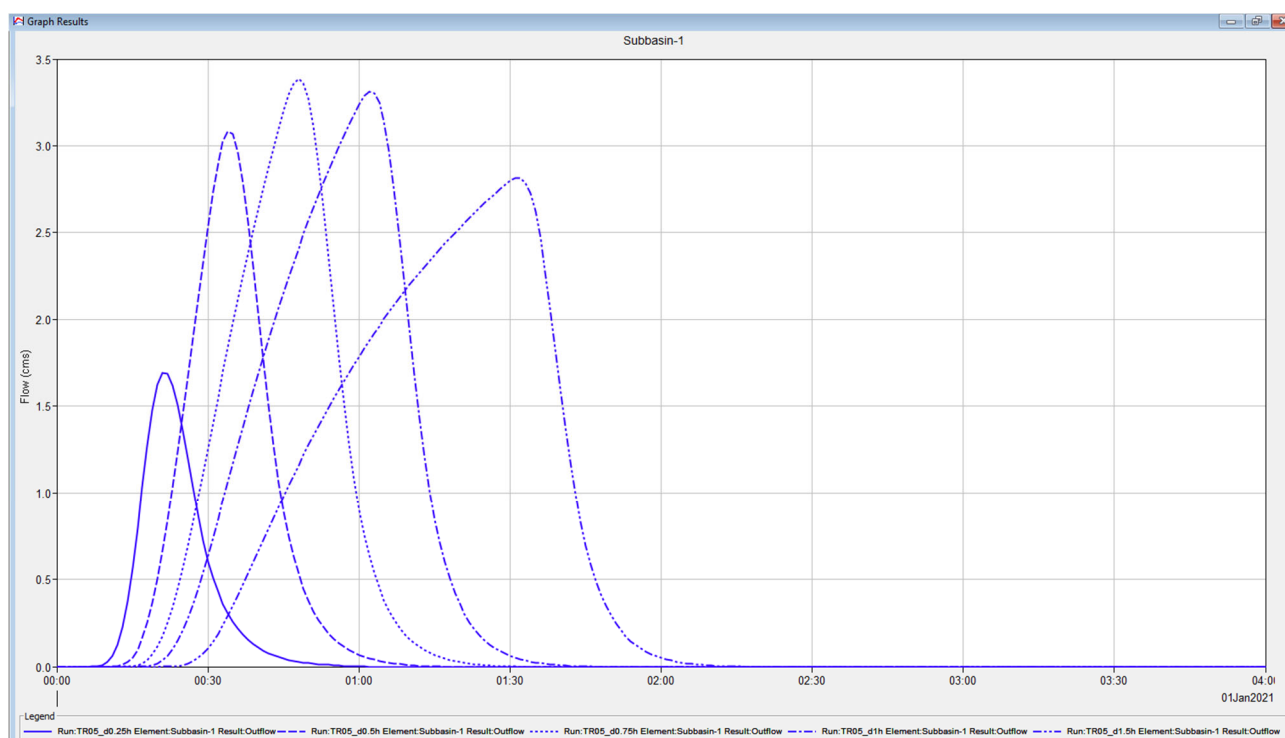


Figura 3-2: idrogrammi di piena relativi all'evento meteorico critico TR = 5 anni.

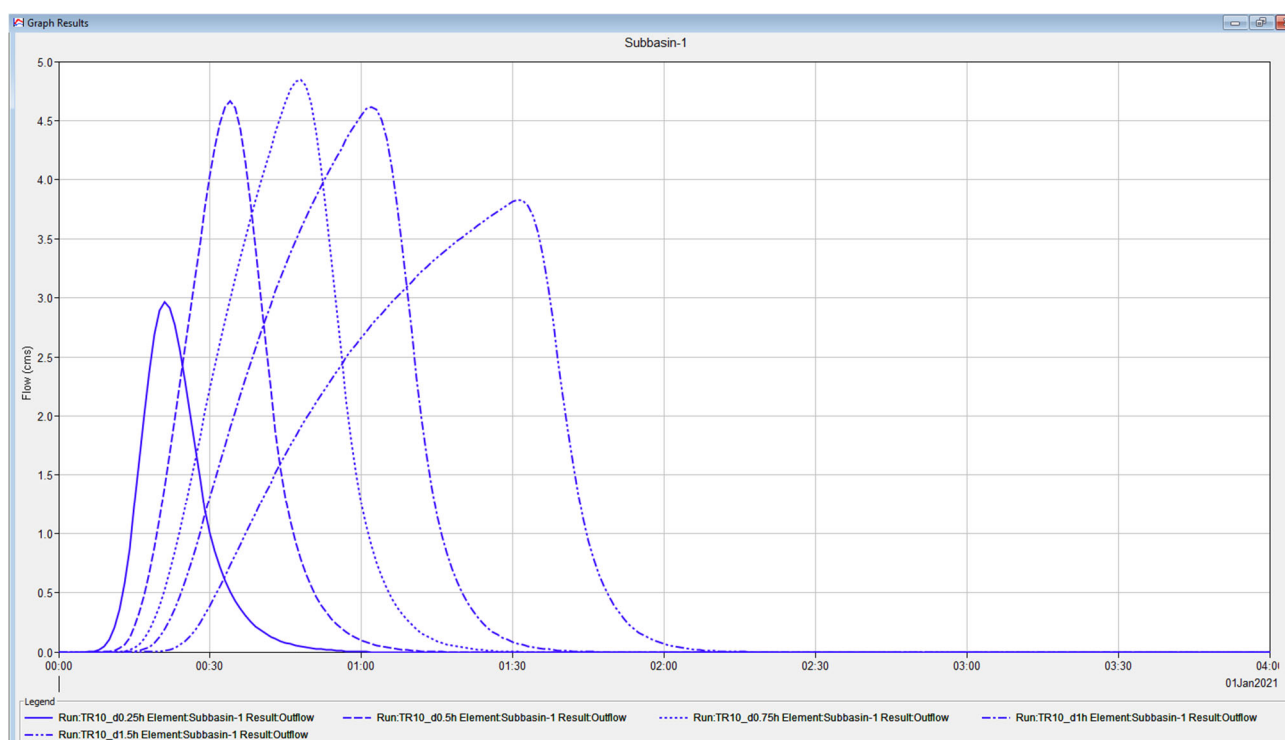


Figura 3-3: idrogrammi di piena relativi all'evento meteorico critico TR = 10 anni.

3.2 Schematizzazione del sistema di vasche volto alla decantazione del materiale solido trasportato in sospensione delle correnti di piena

Sulla base dei dati forniti, tra cui i rilievi topografici messi a disposizione della committenza, nel modello numerico sono state schematizzate le n°15 vasche nella configurazione di progetto (Figura 3-4) come elementi “reservoir aventi ciascuno un elemento di uscita definito mediante “spillways” (sfioratori di superficie a larga soglia) ad

eccezione dell'uscita dalla vasca 8 definita con elemento "culvert". In Tabella 3-1 se ne riportano le principali caratteristiche.

Tabella 3-1: principali caratteristiche delle n°15 vasche

Invaso					Collegamento in uscita							
ID	Quota ciglio	H	Quota fondo	Area	Volume	Tratto	Regolazione dall'invaso di monte	Tipologia	Quota scorrimento 1	Lunghezza	Quota scorrimento 2	Pendenza media
V0	590.0	4.0	586.0	610.0	2440.0	V0-V1	S. sfiorante largh. 3 m	Canale trapezio in terra	589.0	115.0	562.0	0.23
V1	562.0	4.0	558.0	140.0	560.0	V1-V8	S. sfiorante largh. 3 m	Canale rettangolare in c.c.a.	561.0	20.0	560.0	0.05
V8	559.0	4.0	555.0	80.0	320.0	V8-V9.1	S. sfiorante largh. 3 m	Scat. 2.0 m x1.0 m	557.5	3.0	557.3	0.07
V9.1	557.0	2.0	555.0	150.0	300.0	V9.1-V9.2	S. sfiorante largh. 3 m	Stramazzo a luce rettangolare	556.0	0.0	556.0	-
V9.2	554.0	2.0	552.0	150.0	300.0	V9.2-V9.3	S. sfiorante largh. 3 m	Stramazzo a luce rettangolare	553.0	0.0	553.0	-
V9.3	551.0	2.0	549.0	200.0	400.0	V9.3-V9.4	S. sfiorante largh. 3 m	Stramazzo a luce rettangolare	550.0	0.0	550.0	-
V9.4	548.0	2.0	546.0	220.0	440.0	V9.4-V2	S. sfiorante largh. 3 m	Canale trapezio in terra	547.0	30.0	546.5	0.02
V2	547.5	4.0	543.5	108.0	432.0	V2-V3	S. sfiorante largh. 4 m	Canale trapezio in terra	546.5	5.0	546.4	0.02
V3	547.4	4.0	543.4	90.0	360.0	V3-V4	S. sfiorante largh. 4 m	Canale trapezio in terra	546.4	5.0	546.3	0.02
V4	547.3	4.0	543.3	190.0	760.0	V4-V5	S. sfiorante largh. 3 m	Canale trapezio in terra	546.3	5.0	546.2	0.02
V5	546.0	4.0	542.0	57.0	228.0	V5-V6.1	S. sfiorante largh. 5 m	Canale trapezio in terra	545.0	5.0	544.9	0.02
V6.1	545.9	4.0	541.9	250.0	1000.0	V6.1-V6.2	S. sfiorante largh. 3 m	Canale trapezio in terra	544.9	5.0	544.8	0.02
V6.2	545.8	4.0	541.8	366.0	1464.0	V6.2-V7.1	S. sfiorante largh. 3 m	Canale trapezio in terra	544.8	5.0	544.7	0.02
V7.1	545.7	4.0	541.7	256.0	1024.0	V7.1-V7.2	S. sfiorante largh. 3 m	Canale trapezio in terra	544.7	5.0	544.6	0.02
V7.2	545.6	4.0	541.6	360.0	1440.0	V7.2-RECAPITO	S. sfiorante largh. 3 m	Canale trapezio in terra	544.6	15.0	544.5	0.01
					11468.0	VOLUME TOTALE						



Figura 3-4: rappresentazione planimetrica delle vasche nella configurazione di progetto.

Gli elementi “spillway” sono stati schematizzati come stramazzi in parete grossa con coefficiente di efflusso pari a 0.385. I canali di collegamento tra le vasche presentano una larghezza media pari a 3 m e altezza pari a 1 m. Quale condizione al contorno iniziale, tutte le vasche sono state assunte vuote all'inizio dell'evento pluviometrico.

4 Risultati delle analisi

I risultati ottenuti con le simulazioni numeriche sopra descritte sono riassunti in dettaglio nelle tabelle seguenti.

In particolare, ricordando che, sulla base dei dati forniti dalla committenza, le vasche nella configurazione di progetto consentiranno uno stoccaggio temporaneo di complessivi 11470 mc circa di volumi idrici generati dal bacino idrografico sotteso, le analisi idrologico-idrauliche svolte, sulla base dei più cautelativi dati di pioggia ricavati dallo studio di regionalizzazione del 2020, dimostrano che il sistema accumulo sarà in grado di invasare completamente, senza generare efflussi, tutti gli eventi con TR = 5 anni analizzati (durate comprese tra 15 minuti e 1.5 ore).

Tabella 4-1: risultati di calcolo eventi TR = 5 anni, d = 15' – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR05_d0.25h				
Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino				
End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR05_0.25h				
Compute Time: 07lug2026, 18:35:59 Control Specifications: Control 1				
Show Elements: All Elements	Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	1.692	01gen2021, 00:21	1.384
Vasca0	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca8	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca9.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca9.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca9.3	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca9.4	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca3	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca4	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca5	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca6.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca6.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000

Tabella 4-2: risultati di calcolo eventi TR = 5 anni, d = 30' – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR05_d0.5h				
Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino				
End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR05_0.5h				
Compute Time: 07lug2026, 18:35:59 Control Specifications: Control 1				
Show Elements: All Elements	Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	3.083	01gen2021, 00:34	3.350
Vasca0	0.597	2.176	01gen2021, 00:39	1.524
Vasca1	0.597	1.969	01gen2021, 00:42	1.115
Vasca8	0.597	1.699	01gen2021, 00:44	0.924
Vasca9.1	0.597	1.380	01gen2021, 00:46	0.780
Vasca9.2	0.597	1.062	01gen2021, 00:48	0.641
Vasca9.3	0.597	0.641	01gen2021, 00:53	0.445
Vasca9.4	0.597	0.261	01gen2021, 01:01	0.225
Vasca2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca3	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca4	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca5	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca6.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca6.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000

Tabella 4-3: risultati di calcolo eventi TR = 5 anni, d = 45' – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR05_d0.75h				
Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino				
End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR05_0.75h				
Compute Time: 07lug2026, 18:36:00 Control Specifications: Control 1				
Show Elements: All Elements	Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	3.386	01gen2021, 00:48	4.988
Vasca0	0.597	3.300	01gen2021, 00:50	3.163
Vasca1	0.597	3.296	01gen2021, 00:50	2.757
Vasca8	0.597	3.284	01gen2021, 00:51	2.563
Vasca9.1	0.597	3.246	01gen2021, 00:52	2.423
Vasca9.2	0.597	3.192	01gen2021, 00:53	2.294
Vasca9.3	0.597	2.990	01gen2021, 00:54	2.097
Vasca9.4	0.597	2.686	01gen2021, 00:56	1.877
Vasca2	0.597	2.505	01gen2021, 00:58	1.575
Vasca3	0.597	2.154	01gen2021, 01:00	1.321
Vasca4	0.597	1.100	01gen2021, 01:07	0.759
Vasca5	0.597	0.949	01gen2021, 01:09	0.611
Vasca6.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca6.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000

Tabella 4-4: risultati di calcolo eventi TR = 5 anni, d = 1 h – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR05_d1h				
Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino				
End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR05_1h				
Compute Time: 07lug2026, 18:36:00 Control Specifications: Control 1				
Show Elements: All Elements	Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	3.311	01gen2021, 01:02	6.342
Vasca0	0.597	3.278	01gen2021, 01:03	4.515
Vasca1	0.597	3.279	01gen2021, 01:04	4.098
Vasca8	0.597	3.278	01gen2021, 01:04	3.895
Vasca9.1	0.597	3.272	01gen2021, 01:04	3.767
Vasca9.2	0.597	3.272	01gen2021, 01:05	3.616
Vasca9.3	0.597	3.267	01gen2021, 01:05	3.424
Vasca9.4	0.597	3.263	01gen2021, 01:06	3.212
Vasca2	0.597	3.332	01gen2021, 01:06	2.889
Vasca3	0.597	3.261	01gen2021, 01:07	2.599
Vasca4	0.597	2.710	01gen2021, 01:12	2.045
Vasca5	0.597	2.701	01gen2021, 01:12	1.847
Vasca6.1	0.597	1.412	01gen2021, 01:20	1.099
Vasca6.2	0.597	0.000	01gen2021, 04:00	0.000
Vasca7.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000

Tabella 4-5: risultati di calcolo eventi TR = 5 anni, d = 1.5 h – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR05_d1.5h				
Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino				
End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR05_1.5h				
Compute Time: 07lug2026, 18:36:00 Control Specifications: Control 1				
Show Elements: All Elements	Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3			
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	2.816	01gen2021, 01:31	8.007
Vasca0	0.597	2.798	01gen2021, 01:33	6.179
Vasca1	0.597	2.798	01gen2021, 01:33	5.768
Vasca8	0.597	2.797	01gen2021, 01:33	5.589
Vasca9.1	0.597	2.794	01gen2021, 01:34	5.445
Vasca9.2	0.597	2.794	01gen2021, 01:34	5.295
Vasca9.3	0.597	2.790	01gen2021, 01:34	5.102
Vasca9.4	0.597	2.789	01gen2021, 01:35	4.889
Vasca2	0.597	2.788	01gen2021, 01:35	4.578
Vasca3	0.597	2.787	01gen2021, 01:35	4.289
Vasca4	0.597	2.786	01gen2021, 01:36	3.726
Vasca5	0.597	2.789	01gen2021, 01:35	3.519
Vasca6.1	0.597	2.752	01gen2021, 01:38	2.772
Vasca6.2	0.597	1.875	01gen2021, 01:45	1.672
Vasca7.1	0.597	1.029	01gen2021, 01:54	0.905
Vasca7.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000

Per quanto riguarda tempi di ritorno superiori ai 5 anni, si osserva che anche per eventi con TR = 10 anni e durate di precipitazione pari a 15, 30 e 45 minuti, tutti i volumi idrici generati dal bacino idrografico sotteso rimangono immagazzinati nelle vasche.

Per eventi caratterizzati invece da TR > 10 anni e durate di precipitazione pari o superiore a 1 ora, si osserva che i volumi disponibili nelle vasche non sono sufficienti ad immagazzinare completamente gli idrogrammi di piena afferenti al sistema di accumulo temporaneo e decantazione (vedi Tabella 4-9 e Tabella 4-10). In occasione di tali scenari idrologici più gravosi, tuttavia, si osserva che l'idrogramma in uscita dall'ultima vasca, oltre ad avere un picco ed un volume inferiore rispetto a quello in ingresso alla prima vasca, ha inizio, a seconda dell'evento pluviometrico, 60÷80 minuti dopo dell'inizio del riempimento della prima vasca a causa dell'immagazzinamento temporaneo nel sistema di accumulo: tale ritardo favorisce in ogni caso sia la decantazione del materiale solido trasportato di granulometria maggiore, sia una seppur parziale sedimentazione del materiale più fine convogliato in sospensione.

Tabella 4-6: risultati di calcolo eventi TR = 10 anni, d = 15' – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR10_d0.25h Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR10_0.25h Compute Time: 07Aug2026, 18:36:01 Control Specifications: Control 1				
Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3				
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	2.966	01gen2021, 00:21	2.475
Vasca0	0.597	0.892	01gen2021, 00:31	0.647
Vasca1	0.597	0.355	01gen2021, 00:39	0.229
Vasca8	0.597	0.029	01gen2021, 01:01	0.029
Vasca9.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca9.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca9.3	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca9.4	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca3	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca4	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca5	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca6.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca6.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000

Tabella 4-7: risultati di calcolo eventi TR = 10 anni, d = 30' – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR10_d0.5h Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR10_0.5h Compute Time:07lug2026, 18:36:01 Control Specifications:Control 1				
Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3				
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	4.663	01gen2021, 00:34	5.339
Vasca0	0.597	4.407	01gen2021, 00:36	3.520
Vasca1	0.597	4.382	01gen2021, 00:37	3.118
Vasca8	0.597	4.355	01gen2021, 00:37	2.927
Vasca9.1	0.597	4.281	01gen2021, 00:38	2.795
Vasca9.2	0.597	4.146	01gen2021, 00:39	2.667
Vasca9.3	0.597	3.809	01gen2021, 00:41	2.489
Vasca9.4	0.597	3.458	01gen2021, 00:42	2.283
Vasca2	0.597	3.267	01gen2021, 00:44	2.022
Vasca3	0.597	3.084	01gen2021, 00:45	1.760
Vasca4	0.597	1.905	01gen2021, 00:50	1.196
Vasca5	0.597	1.815	01gen2021, 00:51	1.025
Vasca6.1	0.597	0.286	01gen2021, 01:07	0.275
Vasca6.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.1	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000
Vasca7.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000

Tabella 4-8: risultati di calcolo eventi TR = 10 anni, d = 45' – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR10_d0.75h Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR10_0.75h Compute Time:07lug2026, 18:36:02 Control Specifications:Control 1				
Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3				
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	4.844	01gen2021, 00:48	7.617
Vasca0	0.597	4.798	01gen2021, 00:49	5.794
Vasca1	0.597	4.794	01gen2021, 00:49	5.383
Vasca8	0.597	4.784	01gen2021, 00:50	5.219
Vasca9.1	0.597	4.786	01gen2021, 00:50	5.087
Vasca9.2	0.597	4.780	01gen2021, 00:50	4.943
Vasca9.3	0.597	4.771	01gen2021, 00:51	4.754
Vasca9.4	0.597	4.769	01gen2021, 00:51	4.542
Vasca2	0.597	4.800	01gen2021, 00:51	4.269
Vasca3	0.597	4.792	01gen2021, 00:52	4.018
Vasca4	0.597	4.518	01gen2021, 00:54	3.456
Vasca5	0.597	4.474	01gen2021, 00:55	3.289
Vasca6.1	0.597	3.407	01gen2021, 00:59	2.558
Vasca6.2	0.597	1.824	01gen2021, 01:07	1.464
Vasca7.1	0.597	0.808	01gen2021, 01:15	0.697
Vasca7.2	0.597	0.000	01gen2021, 00:00	0.000

Tabella 4-9: risultati di calcolo eventi TR = 10 anni, d = 1 h – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR.10_d.1h Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR.10_1h Compute Time: 07lug2026, 18:36:02 Control Specifications: Control 1				
Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3				
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	4.615	01gen2021, 01:02	9.468
Vasca0	0.597	4.584	01gen2021, 01:03	7.645
Vasca1	0.597	4.579	01gen2021, 01:03	7.247
Vasca8	0.597	4.578	01gen2021, 01:04	7.084
Vasca9.1	0.597	4.577	01gen2021, 01:04	6.955
Vasca9.2	0.597	4.572	01gen2021, 01:04	6.806
Vasca9.3	0.597	4.569	01gen2021, 01:05	6.624
Vasca9.4	0.597	4.564	01gen2021, 01:05	6.413
Vasca2	0.597	4.561	01gen2021, 01:05	6.124
Vasca3	0.597	4.560	01gen2021, 01:06	5.892
Vasca4	0.597	4.560	01gen2021, 01:06	5.341
Vasca5	0.597	4.578	01gen2021, 01:05	5.203
Vasca6.1	0.597	4.539	01gen2021, 01:07	4.464
Vasca6.2	0.597	3.894	01gen2021, 01:12	3.376
Vasca7.1	0.597	3.230	01gen2021, 01:15	2.611
Vasca7.2	0.597	1.760	01gen2021, 01:23	1.532

Tabella 4-10: risultati di calcolo eventi TR = 10 anni, d = 1.5 h – volumi e portate

Project: cava_PRO2026 Simulation Run: TR.10_d.1.5h Start of Run: 01gen2021, 00:00 Basin Model: Bacino End of Run: 01gen2021, 04:00 Meteorologic Model: Met_TR.10_1.5h Compute Time: 07lug2026, 18:36:02 Control Specifications: Control 1				
Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3				
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	0.597	3.830	01gen2021, 01:31	11.708
Vasca0	0.597	3.812	01gen2021, 01:32	9.882
Vasca1	0.597	3.809	01gen2021, 01:33	9.487
Vasca8	0.597	3.810	01gen2021, 01:33	9.316
Vasca9.1	0.597	3.809	01gen2021, 01:33	9.169
Vasca9.2	0.597	3.805	01gen2021, 01:33	9.039
Vasca9.3	0.597	3.805	01gen2021, 01:34	8.852
Vasca9.4	0.597	3.801	01gen2021, 01:34	8.644
Vasca2	0.597	3.800	01gen2021, 01:35	8.330
Vasca3	0.597	3.801	01gen2021, 01:35	8.055
Vasca4	0.597	3.799	01gen2021, 01:35	7.495
Vasca5	0.597	3.798	01gen2021, 01:35	7.307
Vasca6.1	0.597	3.795	01gen2021, 01:36	6.566
Vasca6.2	0.597	3.787	01gen2021, 01:37	5.471
Vasca7.1	0.597	3.786	01gen2021, 01:37	4.709
Vasca7.2	0.597	3.574	01gen2021, 01:41	3.630

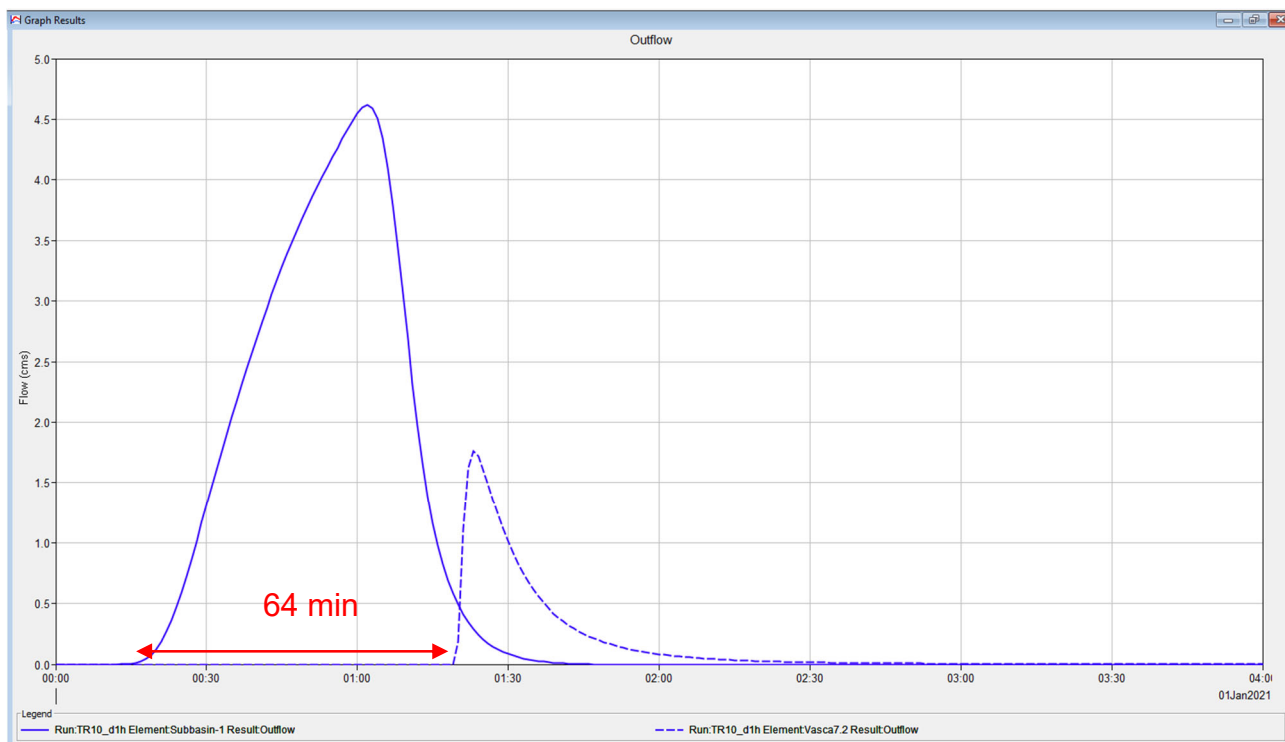


Figura 4-1: confronto tra l'idrogramma in ingresso alla vasca 0 e quello in uscita dalla vasca 7.2 – evento TR10 d=1h. Ritardo ingresso/uscita = 64 minuti.

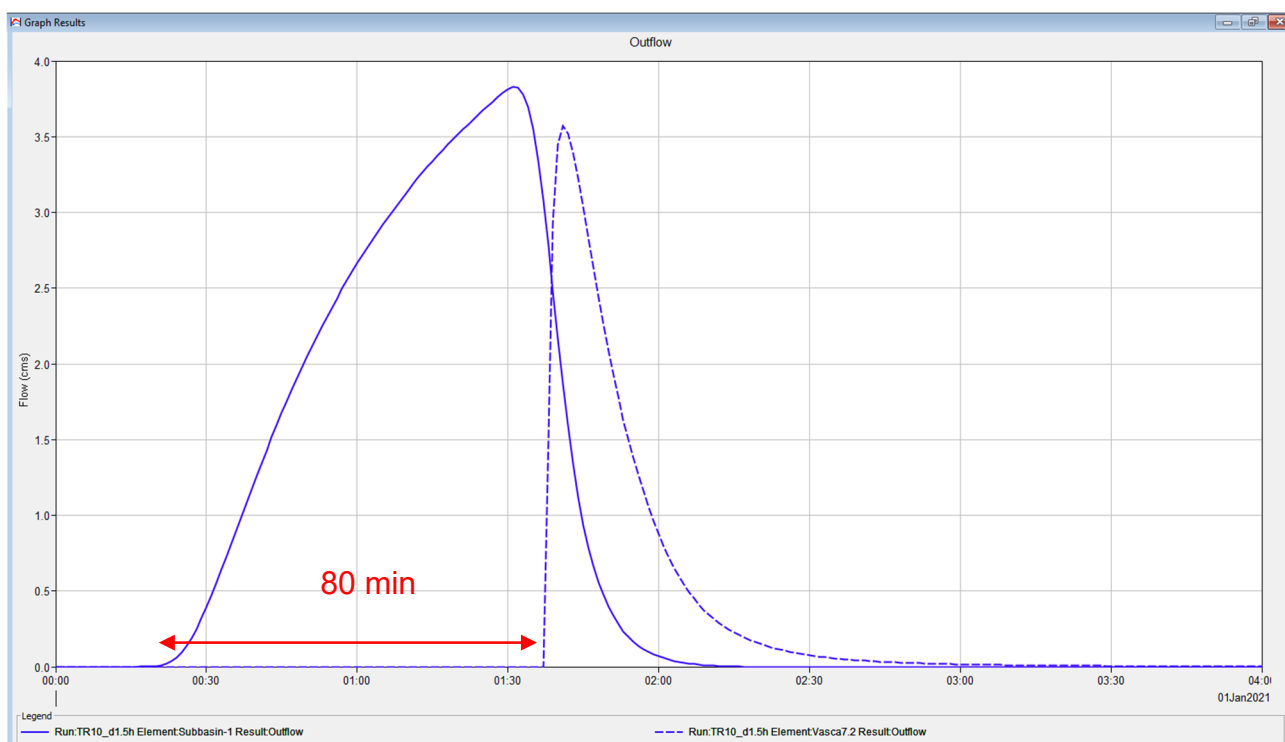


Figura 4-2: confronto tra l'idrogramma in ingresso alla vasca 0 e quello in uscita dalla vasca 7.2 – evento TR10 d=1.5h. Ritardo ingresso/uscita = 80 minuti.