


COMUNE DI BARBERINO VAL D'ELSA e POGGIBONSI


Provincia di FIRENZE e SIENA



INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO DELLA DIGA DROVE DI CEPPARELLO

Codice Elaborato:	Nome Elaborato:	Scala:
DG03	RELAZIONE IDROLOGICA	-
		Data:
		Marzo 2017

Settore:	Sede Firenze Via de Sanctis, 49 Cod. Fiscale e P.I. 06111950488
	<small>Organizzazione dotata di Sistema di Gestione Integrato certificato in conformità alla normativa ISO9001 - ISO14001 - OHSAS18001 - SA8000</small>

PROGETTO: 	RESPONSABILE SICUREZZA : INGEGNERIE TOSCANE	COLLABORATORI GEOLOGIA: Dott. Geol. Carlo FERRI Dott. Geol. Alessandro AGNELLI
PROGETTISTA: Dott. Ing. David SETTESOLDI	IL GEOLOGO : Dott. Geol. Nicola CEMPINI	INDAGINI GEOLOGICHE: GAIA SERVIZI srl LABORATORIO SIGMA Società Geologica e Geofisica AMBIENTE SC
PROGETTISTA STRUTTURE: Dott. Ing. Cristiano REMORINI	UFFICIO ESPROPRI : Geom. Andrea PATRIARCHI Geom. Marco MENICHINI Per. Agr. Davide MORETTI	COMMESSA I.T. :
COLLABORATORI TECNICI: Dott. Ing. Michele CATELLA Dott. Ing. Roberto PINELLI Dott. Geol. Silvia ANGELINI	COMMESSA COMMITTENTE :	
INGEGNERE RESPONSABILE DIGA : RESPONSABILE COMMESSA I.T. : Dott. Ing. Damasco MORELLI	RESPONSABILE DI COMMESSA : Geom. Alessandro PIOLI	
DIRETTORE TECNICO INGEGNERIE TOSCANE : Dott. Ing. Mario CHIARUGI	COMMITTENTE : Dott. Ing. Roberto CECCHINI	

Rev.	Data	Descrizione / Motivo della revisione	Redatto	Controllato / Approvato
00	Marzo 2017	Emissione Progetto di FATTIBILITA'		Morelli / Chiarugi

PROGETTO DI FATTIBILITA'

INDICE

1	PREMESSA	1
2	QUADRO CONOSCITIVO	2
3	ANALISI IDROLOGICA	3
3.1	CARATTERISTICHE DEL MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI	3
3.2	LE FASI COMPUTAZIONALI	6
3.3	MAPPA DEL CURVE NUMBER CN	7
3.4	AGGIORNAMENTO DELLE LSPP	7
3.5	CALCOLO DEI CONTRIBUTI DI PIENA PER I DIVERSI TEMPI DI RITORNO	13
4	VERIFICA DEGLI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO IDRAULICO	14
4.1	CALCOLO DEL FRANCO MINIMO REGOLAMENTARE.....	14
4.2	VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO.....	14
4.2.1	<i>Legge di invaso serbatoio</i>	<i>14</i>
4.2.2	<i>Scale di deflusso scarichi di superficie.....</i>	<i>16</i>
4.2.3	<i>Laminazione esercitata dall'invaso.....</i>	<i>17</i>
4.3	ANNULLAMENTO DEL FRANCO IDRAULICO	21
4.4	VERIRIFICA DELLO SCARICO DI FONDO	22
A.	APPENDICE	25
	IL MODELLO IDROLOGICO	25
	LE PRECIPITAZIONI.....	28
	TABULATI ANALISI IDROLOGICHE.....	30

ELENCO FIGURE

Figura 3-1 – Planimetria bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento della diga di Cepparello.	4
Figura 3-2 – Modello digitale del terreno modello idrologico del bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento della diga di Cepparello.	5
Figura 3-3 – Planimetria dei valori del <i>Curve Number</i> (CN-II) per la Regione Toscana.	8
Figura 3-4 – Mappa del CN modello idrologico del bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento della diga di Cepparello.	9
Figura 3-5 – Spazializzazione sull’intera regione del parametro “ <i>a</i> ” della LSPP per $Tr = 50$ anni (“ <i>Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme</i> ”, 2014).	10
Figura 3-6 – Spazializzazione sull’intera regione del parametro “ <i>n</i> ” della LSPP per $Tr = 50$ anni (“ <i>Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme</i> ”, 2014).	10
Figura 3-7 – Spazializzazione sull’intera regione del parametro “ <i>a</i> ” della LSPP per $Tr = 200$ anni (“ <i>Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme</i> ”, 2014).	11
Figura 3-8 – Spazializzazione sull’intera regione del parametro “ <i>n</i> ” della LSPP per $Tr = 200$ anni (“ <i>Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme</i> ”, 2014).	11
Figura 3-9 – LSPP per il tempo di ritorno di 1000 anni adottata nelle precedenti elaborazioni e quella aggiornata.	12
Figura 3-10 – Idrogrammi delle portate per i vari tempi di ritorno a seguito dell’aggiornamento dell’analisi idrologica.	13
Figura 4-1 – Curva di invaso.	15
Figura 4-2 – Curva di deflusso scolmatore sinistro.	17
Figura 4-3 – Curva di deflusso scolmatore destro.	17
Figura 4-4 – Laminazione del serbatoio per $Tr = 30$ anni nello stato di progetto.	18
Figura 4-5 – Laminazione del serbatoio per $Tr = 50$ anni nello stato di progetto.	19
Figura 4-6 – Laminazione del serbatoio per $Tr = 100$ anni nello stato di progetto.	19
Figura 4-7 – Laminazione del serbatoio per $Tr = 200$ anni nello stato di progetto.	20
Figura 4-8 – Laminazione del serbatoio per $Tr = 500$ anni nello stato di progetto.	20
Figura 4-9 – Laminazione del serbatoio per $Tr = 1000$ anni nello stato di progetto.	21
Figura 4-10 – Andamento del franco e della laminazione del serbatoio al variare del periodo di ritorno.	22
Figura 4-11 – Curve di deflusso per lo scarico esistente e per il nuovo.	24
Figura A-1 – Schema del modello afflussi-deflussi.	25
Figura A-2 – Schema dello ietogramma Chicago.	28

ELENCO TABELLE

Tabella 3-1– Parametri del modello idrologico PIENE.....	7
Tabella 3-2 – Confronto tra i parametri caratteristici medi a , n e m delle LSPP.....	12
Tabella 3-3 – Confronto tra i colmi di portata per i vari periodi di ritorno.....	13
Tabella 4-1– Calcolo del franco idraulico minimo regolamentare.....	14
Tabella 4-2 – Dati utilizzati per la costruzione della legge di invaso (campagna topografica 2016).....	15
Tabella 4-3 – Parametri della curva di invaso.....	15
Tabella 4-4 – Tabulati verifiche idrauliche per la costruzione delle scale di deflusso degli scolmatori sinistro e destro.....	16
Tabella 4-5 – Parametri delle curve di deflusso.....	16
Tabella 4-6 – Portate evacuate e livelli di invaso per i periodi di ritorno di 30, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni.....	18
Tabella 4-7 – Portate evacuate e livelli di invaso per i periodi di ritorno superiori a 1000 anni.....	21
Tabella 4-8 – Valori della scabrezza omogenea equivalente.....	23
Tabella A-1 – Elenco della variabili utilizzate dal modello afflussi-deflussi.....	27
Tabella A-2 – Portate al colmo per la durata di 24 ore per i vari tempi di ritorno aggiornate con le LSPP.	30

1 PREMESSA

Il presente documento costituisce la relazione idrologica a supporto della progettazione preliminare degli interventi di miglioramento della diga di Cepparello ubicata nel Comune di Poggibonsi (Prov. SI) sul Borro di Cepparello.

Le attività condotte nel presente documento hanno riguardato la verifica della conformità degli interventi di miglioramento idraulico previsti ai requisiti indicati nel cap. C.1 del D.M. 26/06/2014.

Nella presente relazione si riportano la metodologia ed i risultati ottenuti dall'analisi idrologica.

Nella prima fase è stato messo a punto un modello idrologico per la stima degli idrogrammi di piena per il bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento. Il modello idrologico adottato è costituito da un modello a parametri distribuiti (*software* PIENE v.4.13).

L'analisi idrologica tiene conto degli studi a condotti dalla Università di Firenze per conto della Regione Toscana per l'aggiornamento delle curve di possibilità pluviometrica.

Nella seconda fase è stato valutato l'effetto di laminazione esercitato dal serbatoio nello stato di progetto sulle portate di piena, col fine di illustrare i sensibili miglioramenti del livello di sicurezza della diga rispetto allo stato attuale.

2 QUADRO CONOSCITIVO

Il presente studio idrologico ha fatto riferimento ai seguenti studi:

- [1] *“Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme. Macroattività B - Modellazione idrologica. Attività B1 - Regionalizzazione precipitazioni”*, studio redatto nell’ambito dell’accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell’Università degli Studi di Firenze per lo sviluppo di attività di ricerca sulla mitigazione del rischio idraulico nella Regione Toscana, finalizzata all’approfondimento dell’attuale quadro conoscitivo e alla definizione delle azioni di riduzione del rischio idraulico e idrogeologico (Caporali E., Chiarello V. e Rossi G., marzo 2014);
- [2] *“Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC. Addendum: Parametrizzazione HMS. Macroattività B - Modellazione idrologica. Attività B2 – Modellazione idrologica caso pilota”*, redatto nell’ambito dell’accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell’Università degli Studi di Firenze per lo sviluppo di attività di ricerca sulla mitigazione del rischio idraulico nella Regione Toscana, finalizzata all’approfondimento dell’attuale quadro conoscitivo e alla definizione delle azioni di riduzione del rischio idraulico e idrogeologico (Castelli F., novembre 2014).

I risultati dell’Analisi di Frequenza Regionale sono archiviati nello spazio ServiziOnline della Regione Toscana:

http://www.regione.toscana.it/cittadini/ambiente/difesa-del-suolo/-/asset_publisher/eonjZadAbVH6/content/nuovi-dati-sulla-regionalizzazione-delle-precipitazioni

I parametri e i risultati derivanti dall’implementazione del modello idrologico distribuito per il territorio toscano sono archiviati nello spazio ServiziOnline della Regione Toscana:

<http://www.regione.toscana.it/-/implementazione-di-modello-idrologico-distribuito-per-il-territorio-toscano>

3 ANALISI IDROLOGICA

L'analisi idrologica, mirata a fornire la valutazione delle portate di piena per il bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento (Figura 3-1), si basa sul modello implementato dal Gestore nelle precedenti elaborazioni e tiene conto degli studi a condotti dall'Università di Firenze per conto della Regione Toscana per l'aggiornamento delle curve di possibilità pluviometrica [1] e per l'implementazione di un modello distribuito per la Toscana MOBIDIC [2].

Il presente modello idrologico è in grado di simulare sia il fenomeno della formazione dell'onda di piena che quello del suo trasferimento a scala di bacino e consente la ricostruzione dei deflussi di piena da utilizzare come *input* per le verifiche idrauliche.

Il modello idrologico è descritto nell'Appendice A alla presente relazione.

In particolare si mette in evidenza quanto segue:

- le curve di possibilità pluviometrica aggiornate fino al 2012 sono quelle elaborate dall'Università di Firenze nello studio [1] per conto della Regione Toscana;
- gli ietogrammi di pioggia sono assunti di forma Chicago con tempo di picco pari a 0.4 volte la durata dell'evento assunta pari a 24 ore;
- la parametrizzazione delle caratteristiche idrologiche del suolo è condotta introducendo la mappa del parametro *Curve Number* CN realizzata dall'Università di Firenze nello studio [2] per conto della Regione Toscana;
- il grado di saturazione adottato è assunto pari a 1.

3.1 CARATTERISTICHE DEL MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI

Il modello idrologico utilizzato può essere classificato come *distribuito* in quanto i parametri sono definiti per ognuna delle singole celle che caratterizzano il bacino idrografico. Dal punto di vista concettuale il modello valuta dapprima la formazione del deflusso superficiale mediante la simulazione del fenomeno dell'intercettazione e, successivamente, il trasferimento di tale deflusso sino alla sezione di chiusura.

Il modello che simula il fenomeno dell'intercettazione calcola il deflusso superficiale mediante il parametro *Curve Number* CN. Il modello mette in conto anche la componente di deflusso ipodermico che raggiunge il reticolo con tempi maggiori rispetto al deflusso superficiale.

La simulazione delle modalità di trasferimento del deflusso superficiale si basa sulla schematizzazione del fenomeno mediante una componente di tipo cinematico e una di tipo "serbatoio lineare" (modello tipo *Clark*).

Il tempo di trasferimento per ciascuna cella, dipendente da entrambi i fenomeni sopra richiamati, è stimato in funzione della sua distanza dalla foce.

L'applicazione di un modello a parametri distribuiti prevede la schematizzazione a celle del bacino, per ciascuna delle quali viene definito un *set* di parametri che ne caratterizzano la risposta idrologica.

Il modello idrologico a parametri distribuiti utilizzato prevede l'uso dei seguenti dati di base:

- curve di possibilità pluviometrica;
- modello digitale del terreno con maglia 400 × 400 m (Figura 3-2);
- mappa del CN con maglia 400 × 400 m.

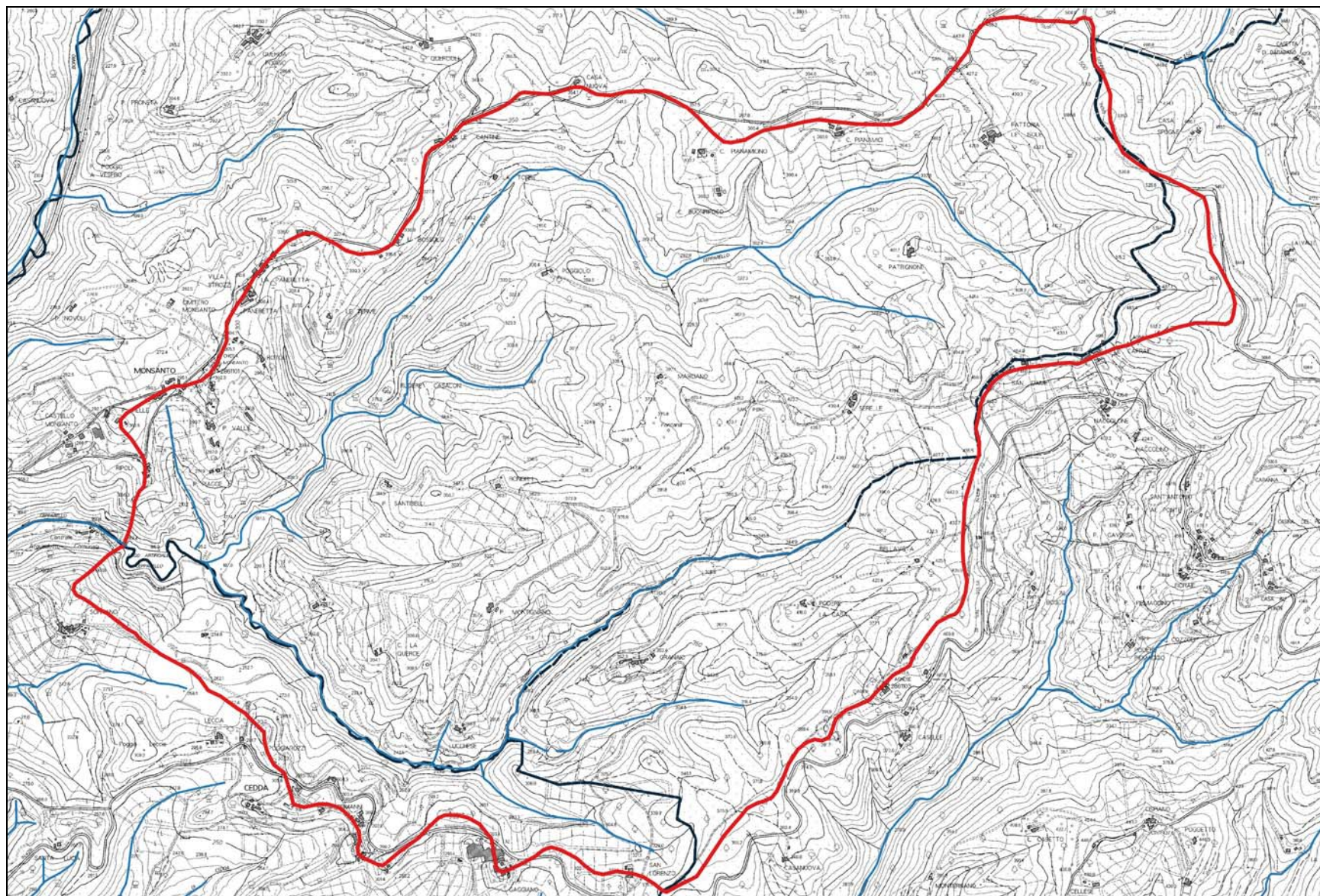


Figura 3-1 – Planimetria bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento della diga di Cepparello.

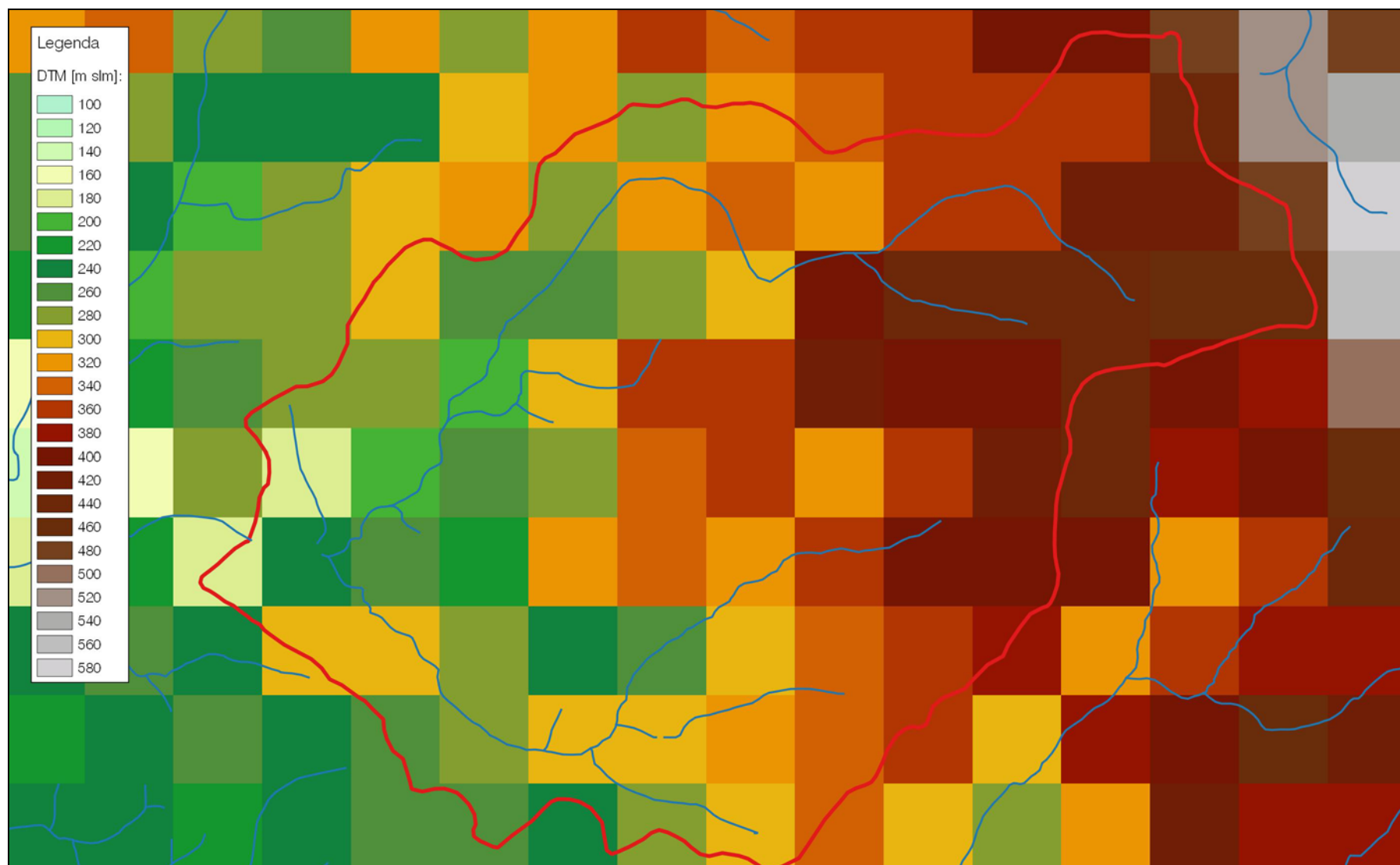


Figura 3-2 – Modello digitale del terreno modello idrologico del bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento della diga di Cepparello.

Il modello necessita, inoltre, di una serie di mappe relative alle grandezze idrologiche e geografiche che forniscono la parametrizzazione dei processi di formazione e trasferimento dei deflussi sul bacino in esame:

- mappa dei puntatori;
- mappa degli ordini di calcolo;
- mappa dei bacini;
- mappa delle velocità;
- mappa dei tempi di trasferimento.

I tempi di trasferimento sono valutati con una velocità media del bacino di 1 m/s.

3.2 LE FASI COMPUTAZIONALI

Il calcolo viene condotto per ciascuna cella e per tutti i passi temporali secondo le seguenti fasi:

- *intercettazione*: in questa fase si effettua una stima della quantità di acqua che viene comunque sottratta al deflusso superficiale. La stima è riferita ad una componente iniziale che comprende le varie perdite per intercettazione (vegetazione, assorbimento del suolo) e ad una componente a regime riferita alla capacità di infiltrazione a saturazione;
- *suolo*: in questa fase si ricostruisce il bilancio idrologico del suolo, valutando la quantità d'acqua che va ad alimentare il volume profondo e la componente del deflusso ipodermico;
- *canale*: in questa fase si simula il trasferimento del deflusso superficiale e di quello ipodermico dalla singola cella alla sezione di chiusura.

All'inizio dell'evento di precipitazione una parte della pioggia si infiltra nel suolo fino a saturarne la capacità di ritenuta. Saturato tale volume, l'acqua continua a infiltrare nel suolo con un tasso definito dalla velocità di infiltrazione. Se l'afflusso eccede la velocità di infiltrazione si ha deflusso superficiale verso il canale. Tale deflusso contribuisce alla portata con un ritardo dettato dal modello di trasferimento.

Il bilancio del serbatoio "suolo" tiene pertanto conto da una parte dell'afflusso per infiltrazione, dall'altra delle perdite. Le perdite sono tali che per suolo saturo la quantità di acqua che si infiltra nel suolo sia pari alla velocità di infiltrazione.

La capacità di ritenuta [mm], ovvero la quantità di acqua che può essere immagazzinata nella parte gravitazionale del suolo (grado di saturazione uguale a 1), e la velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h], che rappresenta la velocità di infiltrazione nel suolo in condizioni di saturazione (grado di saturazione uguale a 1), sono definite tramite mappe con maglia uguale a quella del modello digitale del terreno.

Sulla base di quanto esposto, il modello necessita della definizione dei seguenti parametri validi su tutto il bacino:

- grado di saturazione iniziale, che rappresenta la percentuale di acqua presente nel volume gravitazionale di suolo;
- coefficiente di ripartizione cinematico/invaso, che esprime il peso relativo del tempo di ritardo attribuibile alla componente cinematica e alla componente di serbatoio lineare;
- parametro di scala per il calcolo della velocità di trasferimento, che rappresenta la velocità con cui il deflusso superficiale generato nella singola cella si trasferisce alla sezione di chiusura.

Nella Tabella 3-1 si riportano i valori dei parametri adottati per la ricostruzione delle portate di piena. A differenza delle precedenti elaborazioni idrologiche, nella presente progettazione è assunto un grado di saturazione iniziale pari a 1, corrispondente alla condizione estrema AMCIII di massima saturazione del terreno ante evento.

Grado di saturazione iniziale α_0	1.0
Coeff. di ripartizione cinematico/invaso CI	0.45
Molt. velocità di trasferimento MT	1.0
Molt. infiltrazione a saturazione IN	1.0
Molt. capacità di ritenuta RI	1.0

Tabella 3-1– Parametri del modello idrologico PIENE.

3.3 MAPPA DEL CURVE NUMBER CN

Il modello idrologico è aggiornato introducendo la mappa del parametro *Curve Number* CN realizzata nell'ambito dello studio "Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC. Addendum: Parametrizzazione HMS. Macroattività B - Modellazione idrologica. Attività B2 – Modellazione idrologica caso pilota".

I parametri del suolo definiti per il modello MOBIDIC si basano sullo specifico studio effettuato dalla *Soildata S.r.l. di Lorenzo Gardin*, nell'ambito del quale è stata prodotta la nuova mappa di suoli della Regione Toscana riportante varie informazioni quantitative sullo strato superficiale (30 cm) e sub-superficiale (150 cm). Queste includono la prevalente classe tessiturale USDA. Da questa è stata dedotta la classe *HSG* secondo le indicazioni di *Schoeneberger et al.* (1998).

Per quanto riguarda l'informazione sull'uso del suolo è stato utilizzato lo strato informativo *Corine Land Cover* aggiornato al 2006.

I parametri del CN ottenuti sono condivisi come *shapefile* (Figura 3-3).

La risposta del bacino in termini di formazione del deflusso è espressa nel modello idrologico a parametri distribuiti tramite la mappa del parametro CN con maglia 400 × 400m (Figura 3-4) elaborata a partire dal succitato *shapefile*.

3.4 AGGIORNAMENTO DELLE LSPP

L'analisi idrologica è condotta utilizzando i risultati ottenuti nell'ambito della "Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme. Macroattività B - Modellazione idrologica. Attività B1 - Regionalizzazione precipitazioni", i cui obiettivi sono:

- aggiornamento del database dei dati pluviometrici estremi fino all'anno 2012 compreso;
- analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme giornaliere e di durata oraria compresa fra 1 ora e 24 ore;
- aggiornamento delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP) rispetto a quelle attualmente in uso presenti nel software ALTO (2000) e a quelle pubblicate dal Settore Idrologico della Regione Toscana SIR (2002) mediante un'analisi di frequenza regionale.

Nello studio condotto dall'Università di Firenze è stato scelto di utilizzare la formula monomia della curva o linea segnalatrice di probabilità pluviometrica (LSPP) comunemente descritta da una legge di potenza del tipo:

$$h(t) = at^n \quad [3.1]$$

dove h è l'altezza di pioggia in [mm] e t la durata in [ore], mentre a e n sono i parametri caratteristici espressi per i tempi di ritorno 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni.

Lo studio rende disponibili, per i tempi di ritorno 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni, i parametri a e n con una griglia 1km × 1km su tutta la regione.

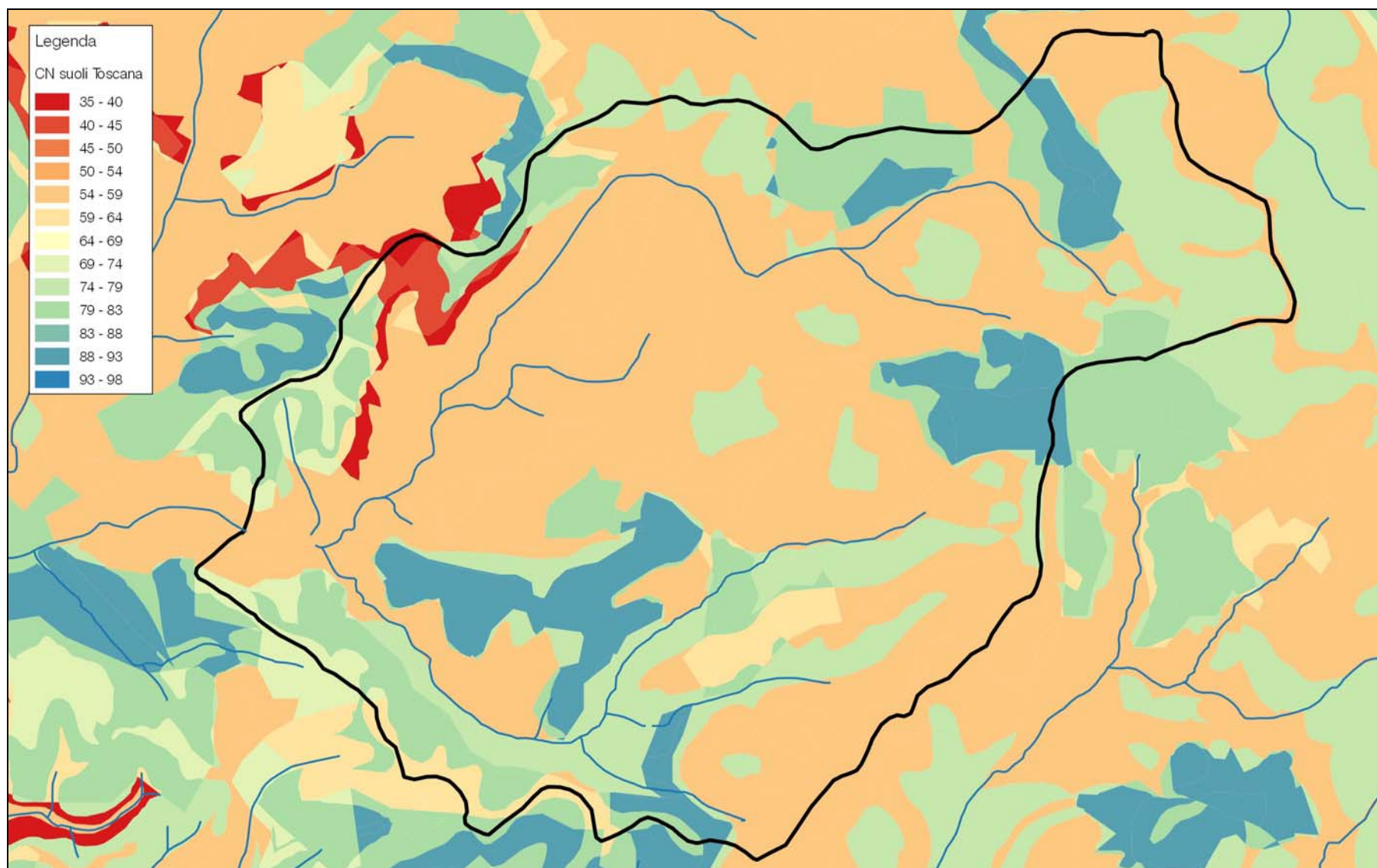


Figura 3-3 – Planimetria dei valori del Curve Number (CN-II) per la Regione Toscana.

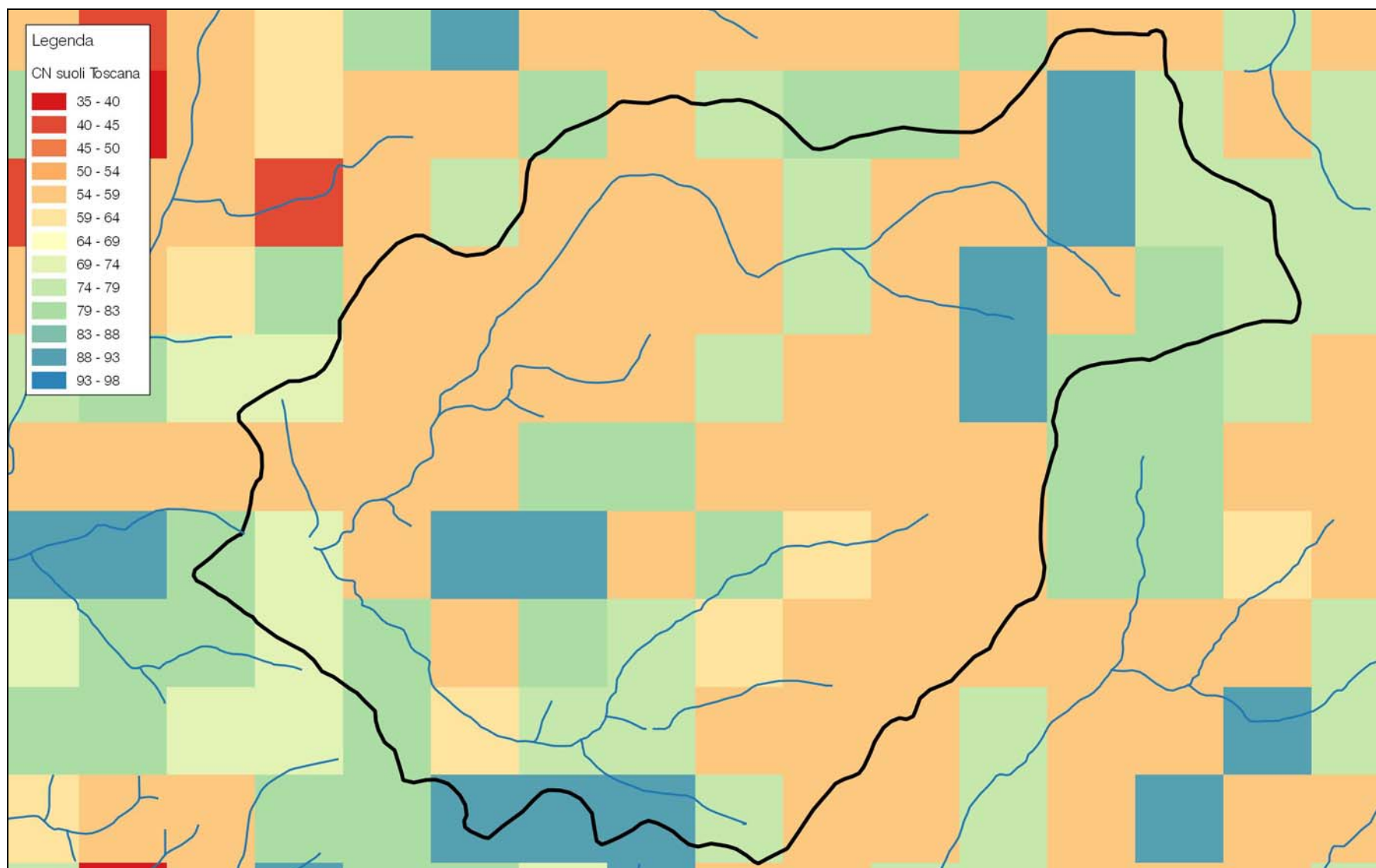


Figura 3-4 – Mappa del CN modello idrologico del bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento della diga di Cepparello.

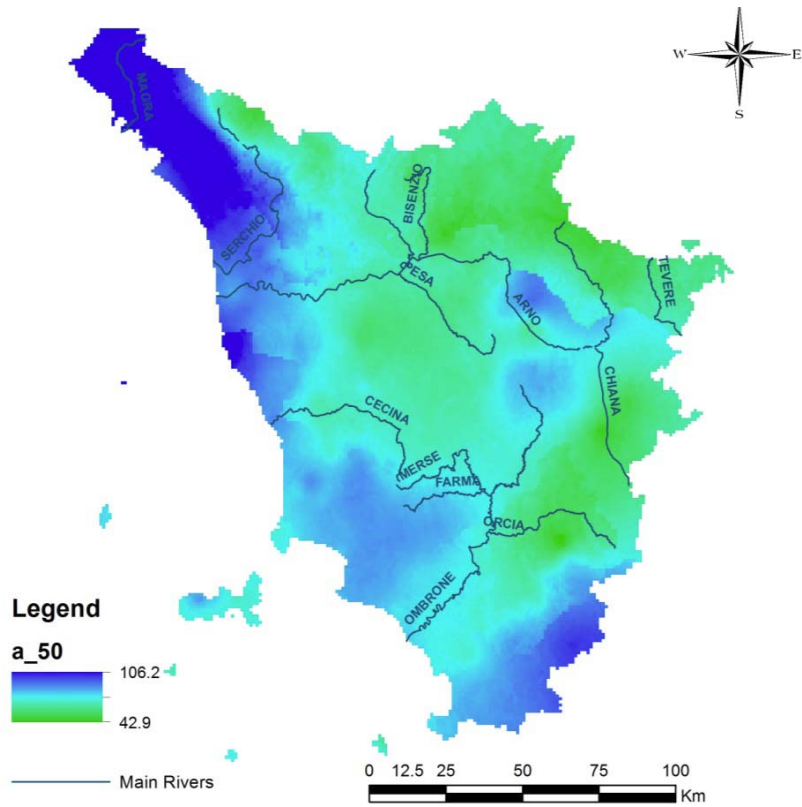


Figura 3-5 – Spazializzazione sull'intera regione del parametro "a" della LSPP per $Tr = 50$ anni ("Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme", 2014).

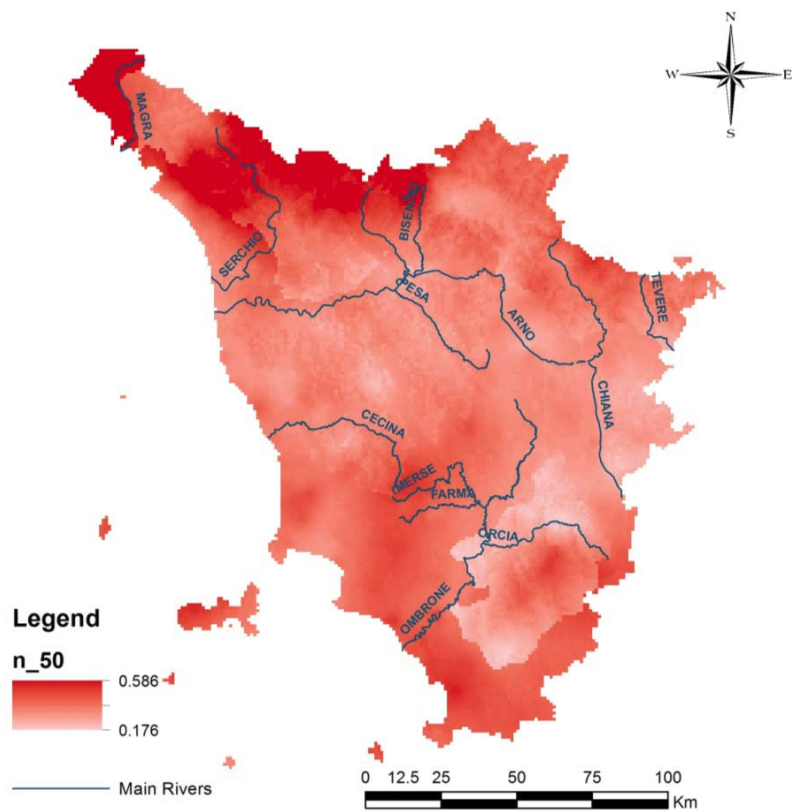


Figura 3-6 – Spazializzazione sull'intera regione del parametro "n" della LSPP per $Tr = 50$ anni ("Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme", 2014).

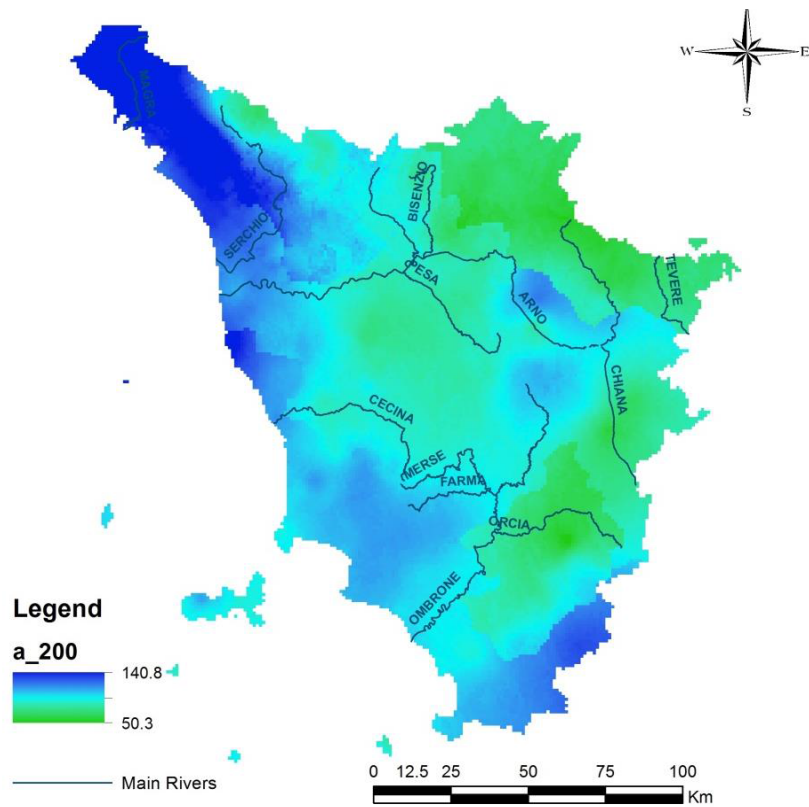


Figura 3-7 – Spazializzazione sull'intera regione del parametro "a" della LSPP per $Tr = 200$ anni ("Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme", 2014).

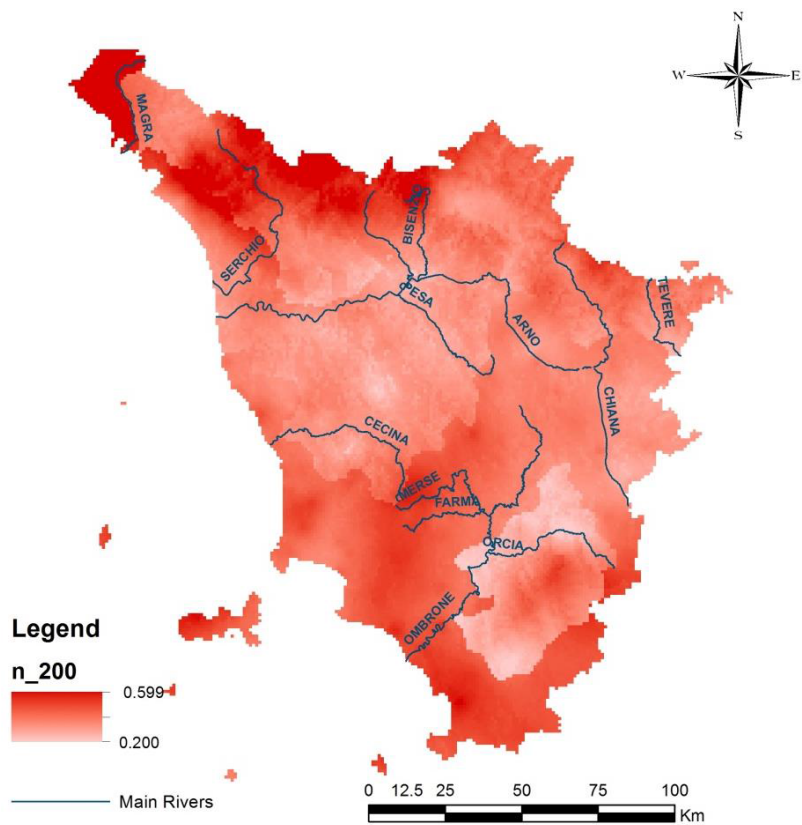


Figura 3-8 – Spazializzazione sull'intera regione del parametro "n" della LSPP per $Tr = 200$ anni ("Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme", 2014).

Nella Figura 3-5 e Figura 3-6 si riportano rispettivamente i parametri caratteristici a e n stimati dall'Analisi di Frequenza Regionale per il tempo di ritorno di 50 anni sul territorio regionale, mentre nella Figura 3-7 e nella Figura 3-8 quelli calcolati per il tempo di ritorno di 200 anni.

I risultati sono stati condivisi come ASCII Grid con celle quadrate di risoluzione pari a 1km, georeferenziati nel sistema di riferimento *Gauss Boaga*:

- ASCII Grid dei parametri a ed n delle LSPP per i tempi di ritorno prefissati (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni);
- ASCII Grid delle altezze di pioggia per le 5 durate considerate (1h, 3h, 6h, 12h, 24h) suddivise per i tempi di ritorno prefissati.

Le precipitazioni sul bacino sono calcolate aggiornando le LSPP utilizzate nelle precedenti fasi progettuali con quelle ricavate nello studio del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze.

Le LSPP dello studio del 2014 sono ricondotte alla forma classica $h=a \cdot t^n \cdot T^m$ tramite una regressione multipla, quindi sono calcolati i valori medi dei parametri caratteristici per il bacino idrografico nella sezione di calcolo ubicata in corrispondenza dello sbarramento.

Nella Tabella 3-2 si riportano i valori medi dei parametri a , n e m delle LSPP per le durate superiori ed inferiori all'ora adottati nelle precedenti elaborazioni e quelli ottenuti con il presente aggiornamento.

Nella Figura 3-9 è rappresentato il confronto tra gli andamenti della LSPP calcolata per il tempo di ritorno di 1000 anni nelle precedenti elaborazioni e quella aggiornata.

Descrizione	t > 1 ora			t < 1 ora		
	a	n	m	a	n	m
LSPP studi precedenti	22.136	0.304	0.222	23.856	0.315	0.174
LSPP aggiornamento 2014	26.285	0.268	0.184	26.285	0.268	0.184

Tabella 3-2 – Confronto tra i parametri caratteristici medi a , n e m delle LSPP.

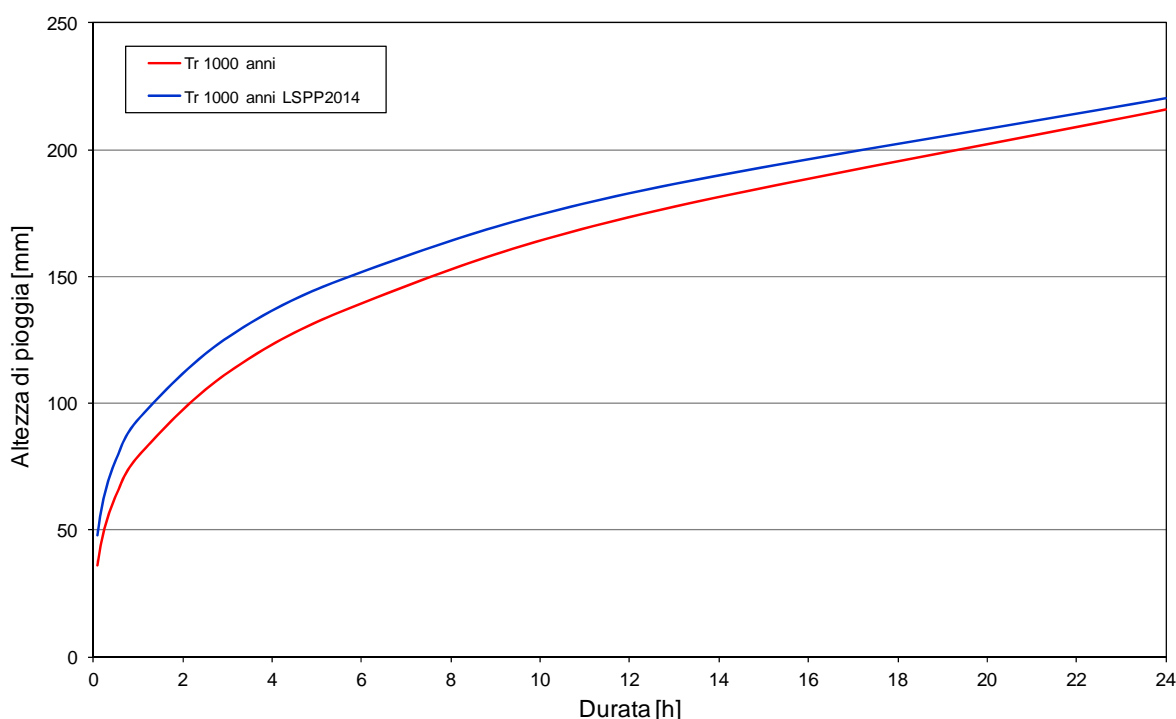


Figura 3-9 – LSPP per il tempo di ritorno di 1000 anni adottata nelle precedenti elaborazioni e quella aggiornata.

3.5 CALCOLO DEI CONTRIBUTI DI PIENA PER I DIVERSI TEMPI DI RITORNO

La stima delle portate di piena per i diversi tempi di ritorno è condotta utilizzando il modello idrologico descritto nei paragrafi precedenti.

L'input di precipitazione, in termini di ietogramma *Chicago*, è ricavato sulla base delle curve di possibilità pluviometria aggiornate al 2012 dall'Università di Firenze (§ 3.4).

La generazione degli idrogrammi di piena è condotta utilizzando ietogrammi di durata pari a 24 ore (ossia sicuramente maggiore del tempo di corrivazione dell'intero bacino).

Le portate di piena per i diversi tempi di ritorno sono valutate nella sezione di chiusura del bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento, caratterizzato da una superficie di 11.36 km².

I risultati delle analisi idrologiche sono tabulati nell'Appendice A.

Nella Tabella 3-3 si riporta il confronto tra i colmi di portata stimati nelle precedenti fasi progettuali e quelli calcolati nel corso del presente aggiornamento, rispettivamente per i tempi di ritorno di 30, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni.

Nella Figura 3-10 sono riprodotti i corrispondenti idrogrammi calcolati per i tempi di ritorno di 30, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni.

Portate	Area bacino [km ²]	Q ₃₀ [m ³ /s]	Q ₅₀ [m ³ /s]	Q ₁₀₀ [m ³ /s]	Q ₂₀₀ [m ³ /s]	Q ₅₀₀ [m ³ /s]	Q ₁₀₀₀ [m ³ /s]
Portate studi precedenti	11.40	66	107	122	–	164	189
Portate aggiornate	11.40	90	102	122	145	180	211

Tabella 3-3 – Confronto tra i colmi di portata per i vari periodi di ritorno.

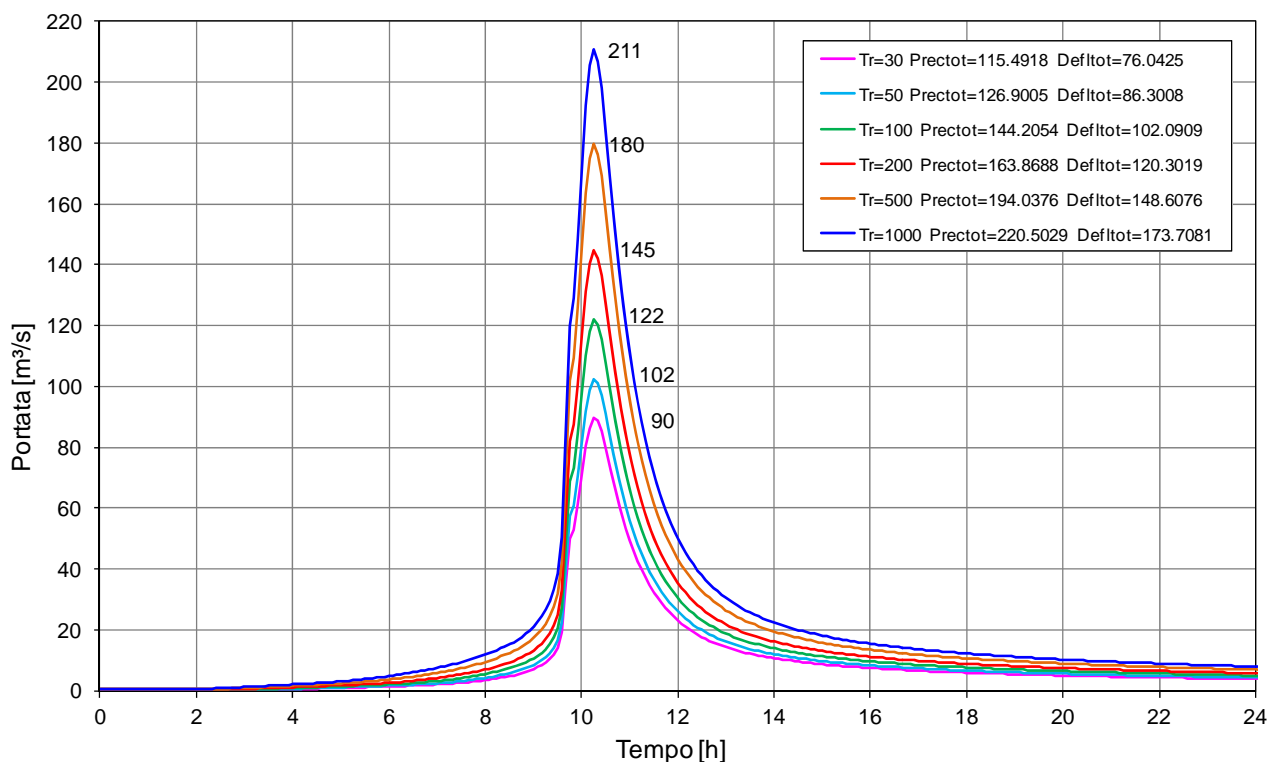


Figura 3-10 – Idrogrammi delle portate per i vari tempi di ritorno a seguito dell'aggiornamento dell'analisi idrologica.

4 VERIFICA DEGLI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO IDRAULICO

Allo stato attuale la diga Dovre di Cepparello presenta carenze strutturali che non garantiscono le minime condizioni di sicurezza idraulica previste dalle norme del D.M. del 26 giugno 2014 per le nuove realizzazioni, in quanto al verificarsi dell'evento millenario la diga potrebbe essere tracimata anche qualora l'invaso fosse limitato o addirittura pressoché vuoto ad inizio evento.

Gli interventi di miglioramento idraulico sono necessari secondo quanto riportato al cap. H.2.2. del D.M. 26/06/2014, essendo il tempo di ritorno della portata di piena scaricabile rispettando il franco idraulico indicato al cap. C.1 inferiore a 1000 anni.

Nel presente capitolo è illustrata la verifica della conformità degli interventi di miglioramento idraulico progettati ai requisiti indicati nel cap. C.1 del D.M. 26/06/2014.

4.1 CALCOLO DEL FRANCO MINIMO REGOLAMENTARE

Si riportano di seguito le determinazioni per il calcolo del franco idraulico minimo regolamentare secondo la procedura riportata ai capp. C.1 e C.2 del D.M. del 26 giugno 2014.

Il franco netto risultante dalla procedura di interpolazione (tra il valore di 1.5 m attribuito alle dighe alte 3.5 m ed il valore di 15 m associato alle dighe alte 90 m) è 1.771 m essendo l'altezza della diga pari a 25.17 m.

L'abbassamento massimo dovuto al sisma è 0.215 m (vedere elaborato DG.07).

Il valore dell'ampiezza d'onda minimo per *Fetch* 1 km e velocità del vento pari a 100 km/h per la zona 3 vale 0.27 m, mentre la risalita contro il paramento dello sbarramento è pari a 0.033 m.

Il **franco idraulico minimo regolamentare** è, pertanto, pari a **2.29 m** (Tabella 4-1).

Quota coronamento [m s.l.m.]	189.0
Quota minima a valle [m s.l.m.]	163.8
Altezza diga [m]	25.17
Franco netto [m]	1.771
Abbassamento da sisma [m]	0.215
Franco onda [m]	0.27
Franco <i>run up</i> [m]	0.033
Franco minimo totale [m]	2.29

Tabella 4-1– Calcolo del franco idraulico minimo regolamentare.

4.2 VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO

I livelli massimi di invaso associati agli eventi di piena con cui è cimentata la diga sono determinati tenendo conto dell'effetto di laminazione esercitato dal serbatoio

4.2.1 LEGGE DI INVASO SERBATOIO

La legge di invaso utilizzata per la stima della laminazione dell'invaso è determinata sulla base del rilievo topografico realizzato dal Gestore nel corso della campagna di misure svolta nel corso del 2016.

I dati utilizzati per la costruzione della legge di riempimento sono riportati nella Tabella 4-2.

Nella Tabella 4-3 sono restituiti i parametri caratteristici della curva di invaso rappresentata nella Figura 4-1.

Quota [m s.l.m.]	Area specchio liquido [m ²]	Volume invasato [m ³]
174.0	6	0
175.0	11'162	6'244
176.0	18'818	21'050
177.0	22'194	41'731
178.0	25'035	65'333
179.0	31'588	93'440
180.0	38'024	128'258
181.0	43'802	169'707
182.0	47'802	215'483
183.0	52'464	265'517
184.0	59'340	321'118
185.0	65'220	383'527
186.0	70'840	451'508
187.0	76'909	525'463
188.0	83'492	605'620
189.0	90'783	692'681
190.0	99'450	787'692

Tabella 4-2 – Dati utilizzati per la costruzione della legge di invaso (campagna topografica 2016).

a	1348.81
H ₀ [m s.l.m.]	172.0
b	2.20

Tabella 4-3 – Parametri della curva di invaso.

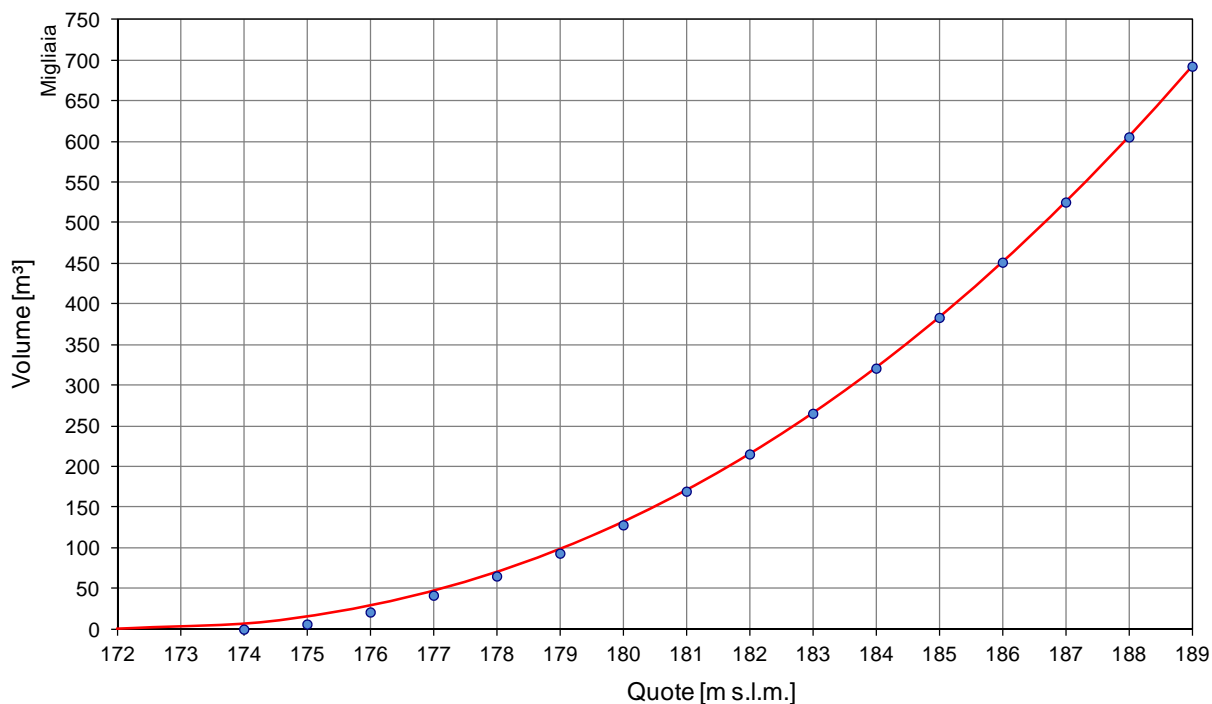


Figura 4-1 – Curva di invaso.

4.2.2 SCALE DI DEFLUSSO SCARICHI DI SUPERFICIE

Le scale di deflusso per la schematizzazione degli scarichi di superficie sono ricavate dai tabulati di calcolo delle verifiche idrauliche condotte in moto permanente in corrente mista del sistema "soglia sfiorante-canale fuggatore" destro e sinistro (vedere elaborato DG.04).

Le verifiche idrauliche sono eseguite adottando un coefficiente di scabrezza di *Gauckler-Strickler* pari a $65 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ e un valore delle perdite concentrate di 0.1 per l'espansione e di 0.2 per la contrazione in funzione della differenza di carico cinetico.

Le soglie di sfioro di entrambi gli scarichi sono costituite da soglie libere con quota di stramazzo a 185.0 m s.l.m. e non sono presidiate da alcuna paratoia.

Con il suddetto modello sono ricavate le coppie di valori portata-livello di invaso sia per lo scarico in sinistra che per lo scarico in destra nello stato di progetto (Tabella 4-4), utilizzate per la costruzione delle relative scale di deflusso.

Scarico superficie sinistro		Scarico superficie destro	
Portata [m ³ /s]	Livello invaso [m s.l.m.]	Portata [m ³ /s]	Livello invaso [m s.l.m.]
0	185.00	0.0	185.00
10.0	185.33	10.0	185.40
20.0	185.52	20.0	185.63
30.0	185.69	30.0	185.83
40.0	185.83	40.0	186.00
50.0	185.96	50.0	186.16
60.0	186.09	60.0	186.31
70.0	186.20	70.0	186.45
80.0	186.31	80.0	186.58
90.0	186.42	90.0	186.71
100.0	186.52	100.0	186.83
110.0	186.62	–	–
120.0	186.72	–	–

Tabella 4-4 – Tabulati verifiche idrauliche per la costruzione delle scale di deflusso degli scolmatori sinistro e destro.

Le scale di deflusso sono rappresentate nella Figura 4-2 e nella Figura 4-3 rispettivamente per lo scolmatore sinistro e destro, mentre i parametri caratteristici di entrambe le scale di deflusso sono restituiti in forma analitica nella Tabella 4-5.

Scarico superficie sinistro		Scarico superficie destro	
a	53.066	a	40.072
H ₀ [m s.l.m.]	185.0	H ₀ [m s.l.m.]	185.0
b	1.510	b	1.510

Tabella 4-5 – Parametri delle curve di deflusso.

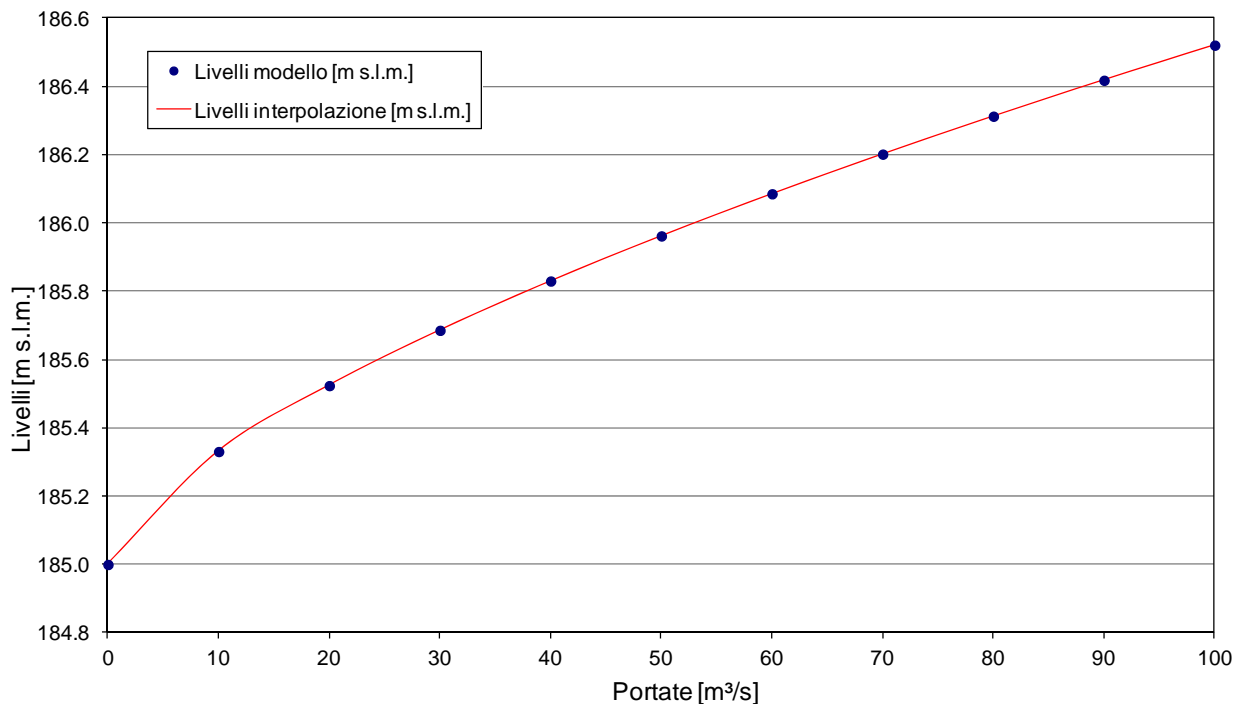


Figura 4-2 – Curva di deflusso scolmatore sinistro.

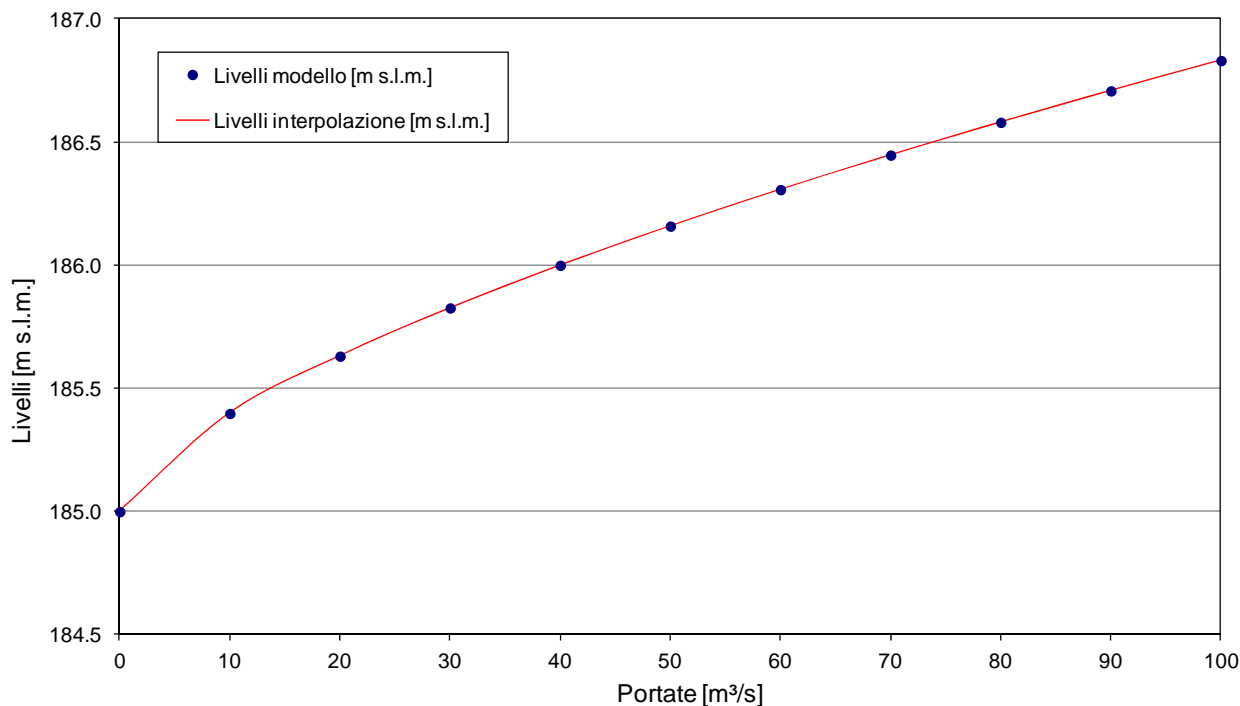


Figura 4-3 – Curva di deflusso scolmatore destro.

4.2.3 LAMINAZIONE ESERCITATA DALL'INVASO

Il calcolo della laminazione degli idrogrammi di piena in arrivo all'invaso è condotto con il solo ausilio degli scarichi di superficie, nell'ipotesi che all'inizio dell'evento il livello nell'invaso corrisponda alla quota di massima regolazione di progetto ovvero pari a 185.0 m s.l.m..

Nella simulazione numerica, in accordo alle modalità di scarico previste dal D.M. 24/03/1982, la portata è evacuata unicamente utilizzando lo scarico di superficie. È dunque ignorato il contributo dello scaricatore di fondo.

I risultati delle elaborazioni relative alla laminazione operata dal serbatoio sugli eventi di piena per i tempi di ritorno di 30, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni sono riportati nella Tabella 4-6.

La massima portata evacuata per l'evento millenario risulta pari a 202.2 m³/s a cui corrisponde un livello idrometrico nell'invaso di 186.67 m s.l.m. (1.67 m rispetto alle soglie di sfioro poste a 185.0 m s.l.m.) con un franco idraulico di 2.33 m.

Nelle condizioni di progetto, con un livello nell'invaso di 186.67 m s.l.m., lo scarico di sinistra evacua 115.2 m³/s e quello di destra 87.0 m³/s.

Nella figure seguenti si riportano gli idrogrammi delle portate affluite al lago, delle portate scaricate e dei livelli nell'invaso in occasione degli eventi di piena per i tempi di ritorno di 30, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni (Figura 4-4, Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8, Figura 4-9).

Tempo di ritorno [anni]	Portata in arrivo [m ³ /s]	Portata uscita totale [m ³ /s]	Portata uscita canale sinistra [m ³ /s]	Portata uscita canale destra [m ³ /s]	Quota livello inizio evento [m s.l.m.]	Quota livello fine evento [m s.l.m.]	Franco idraulico [m]
30	89.54	84.84	48.34	36.50	185.0	185.94	3.060
50	102.31	97.28	55.42	41.85	185.0	186.03	2.971
100	121.94	116.33	66.28	50.05	185.0	186.16	2.841
200	144.56	138.27	78.78	59.49	185.0	186.30	2.701
500	179.66	172.23	98.13	74.10	185.0	186.50	2.497
1000	210.66	202.21	115.21	87.00	185.0	186.67	2.329

Tabella 4-6 – Portate evacuate e livelli di invaso per i periodi di ritorno di 30, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni.

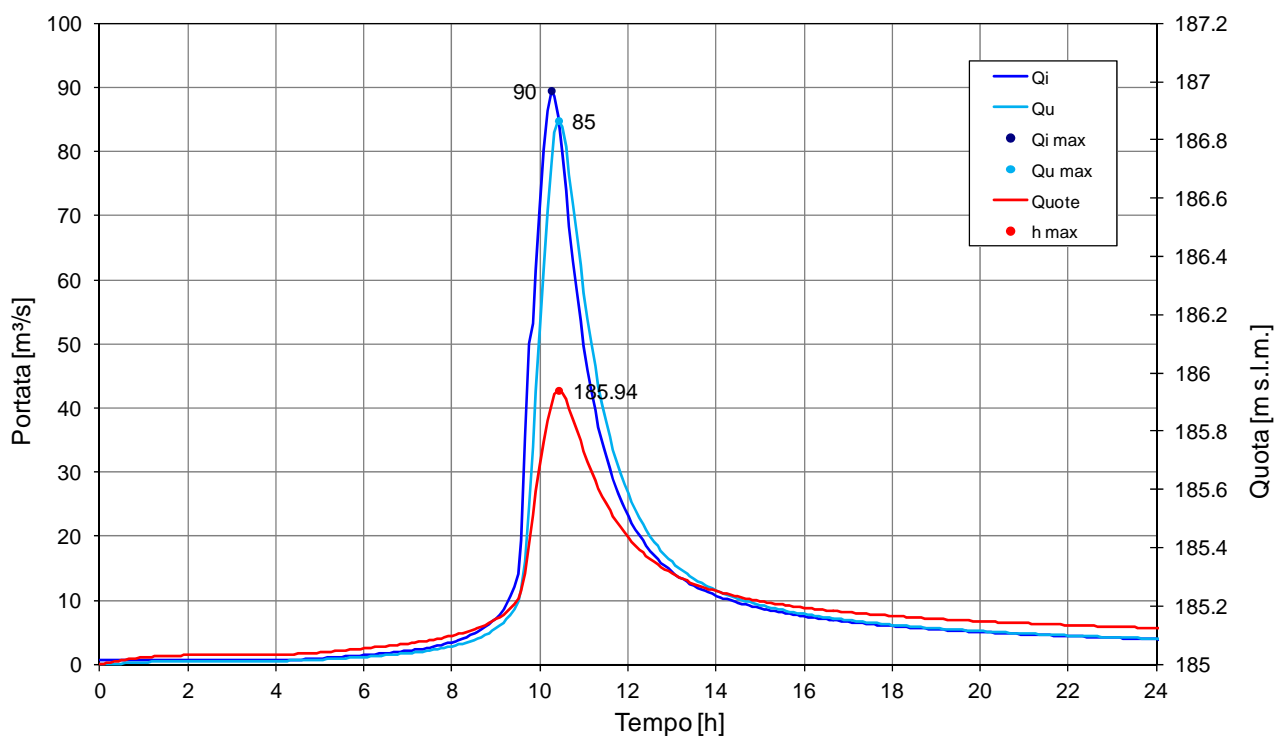


Figura 4-4 – Laminazione del serbatoio per Tr = 30 anni nello stato di progetto.

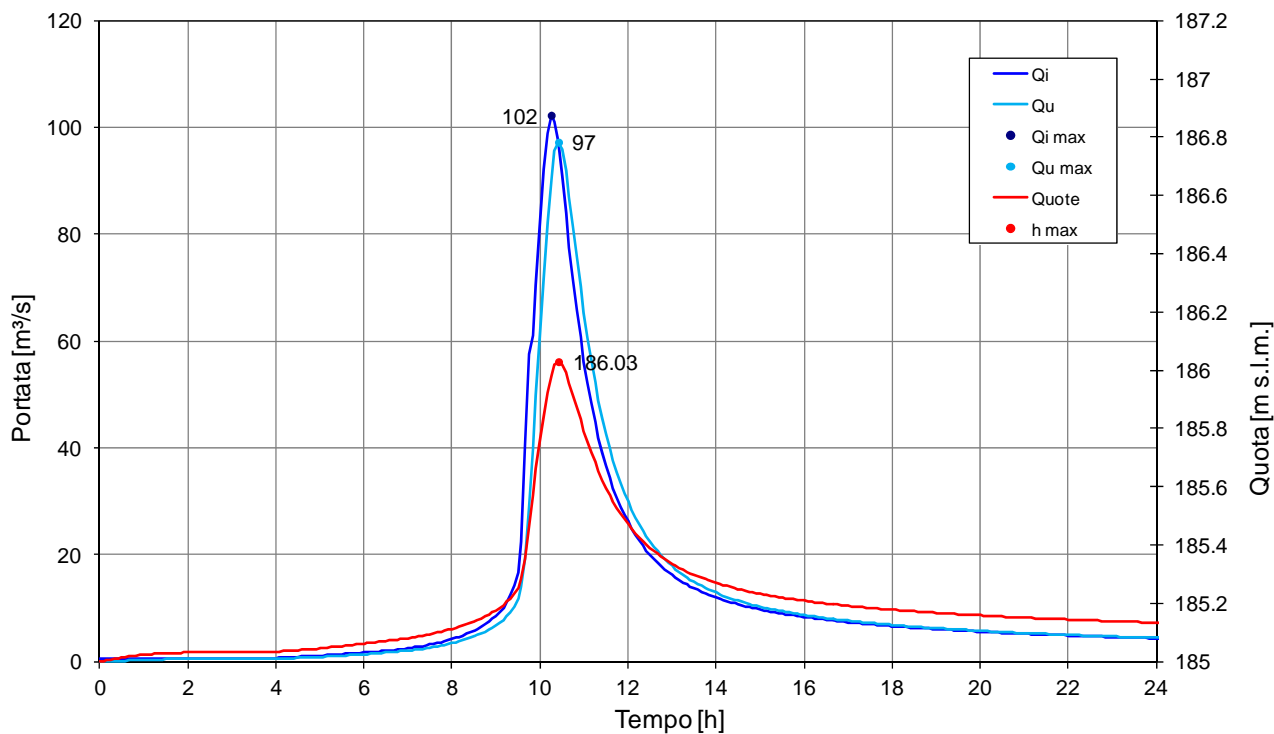


Figura 4-5 – Laminazione del serbatoio per $Tr = 50$ anni nello stato di progetto.

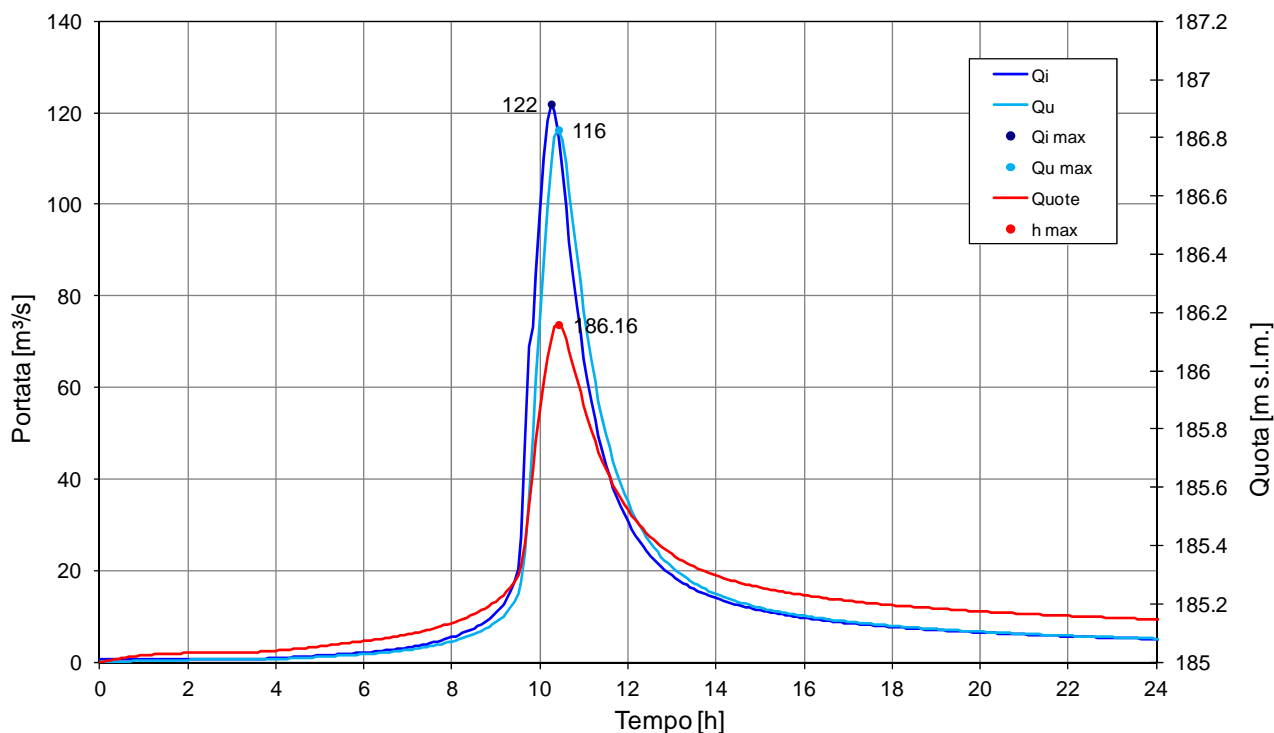


Figura 4-6 – Laminazione del serbatoio per $Tr = 100$ anni nello stato di progetto.

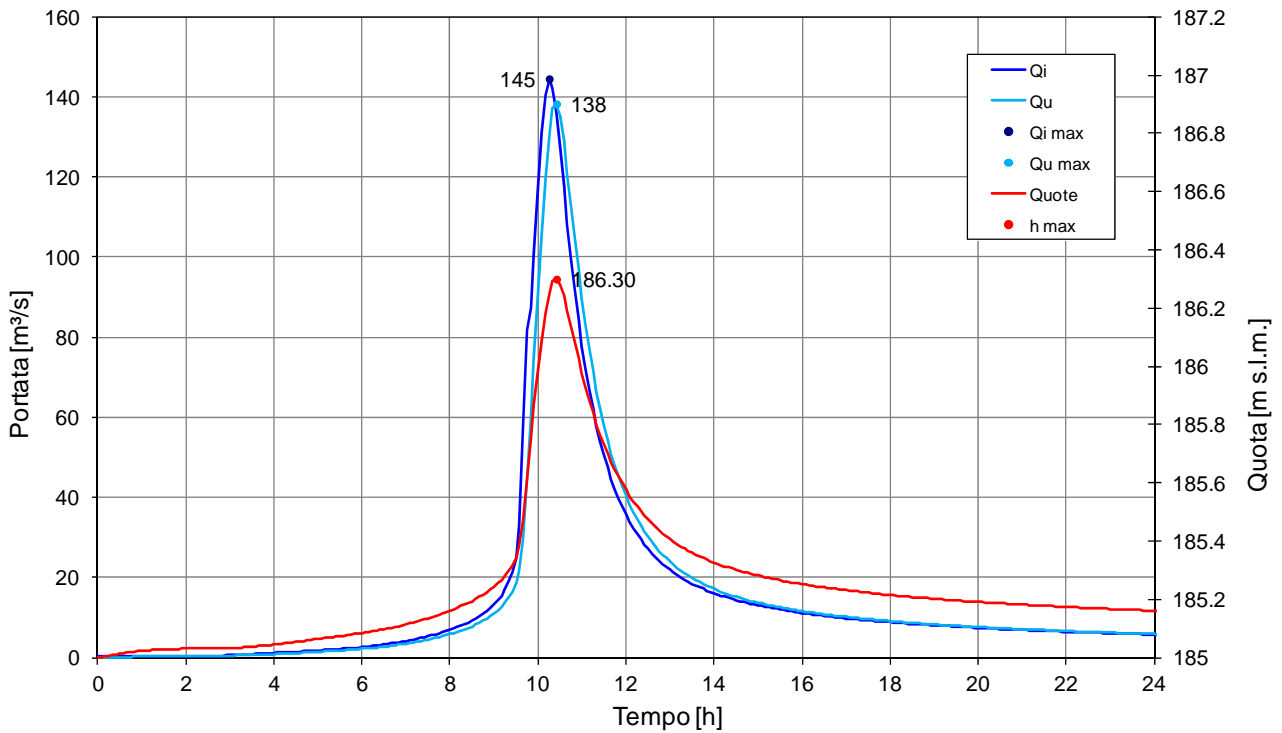


Figura 4-7 – Laminazione del serbatoio per $T_r = 200$ anni nello stato di progetto.

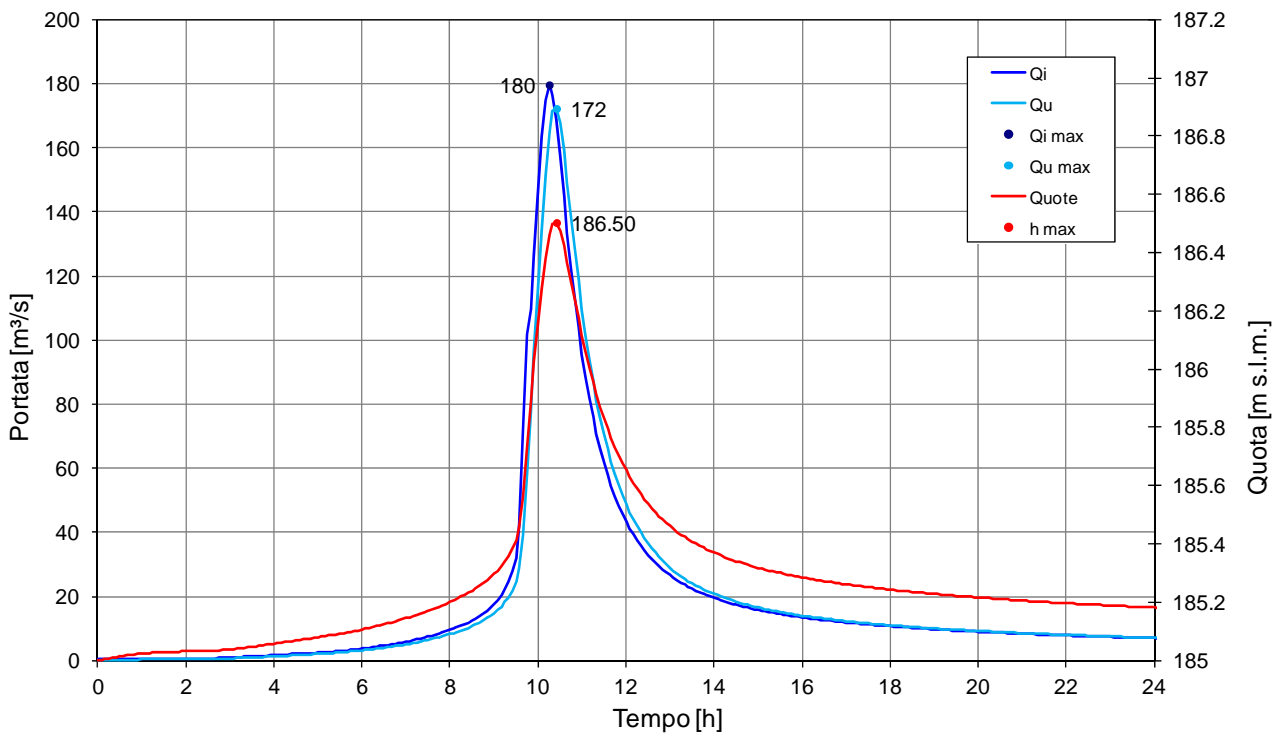


Figura 4-8 – Laminazione del serbatoio per $T_r = 500$ anni nello stato di progetto.

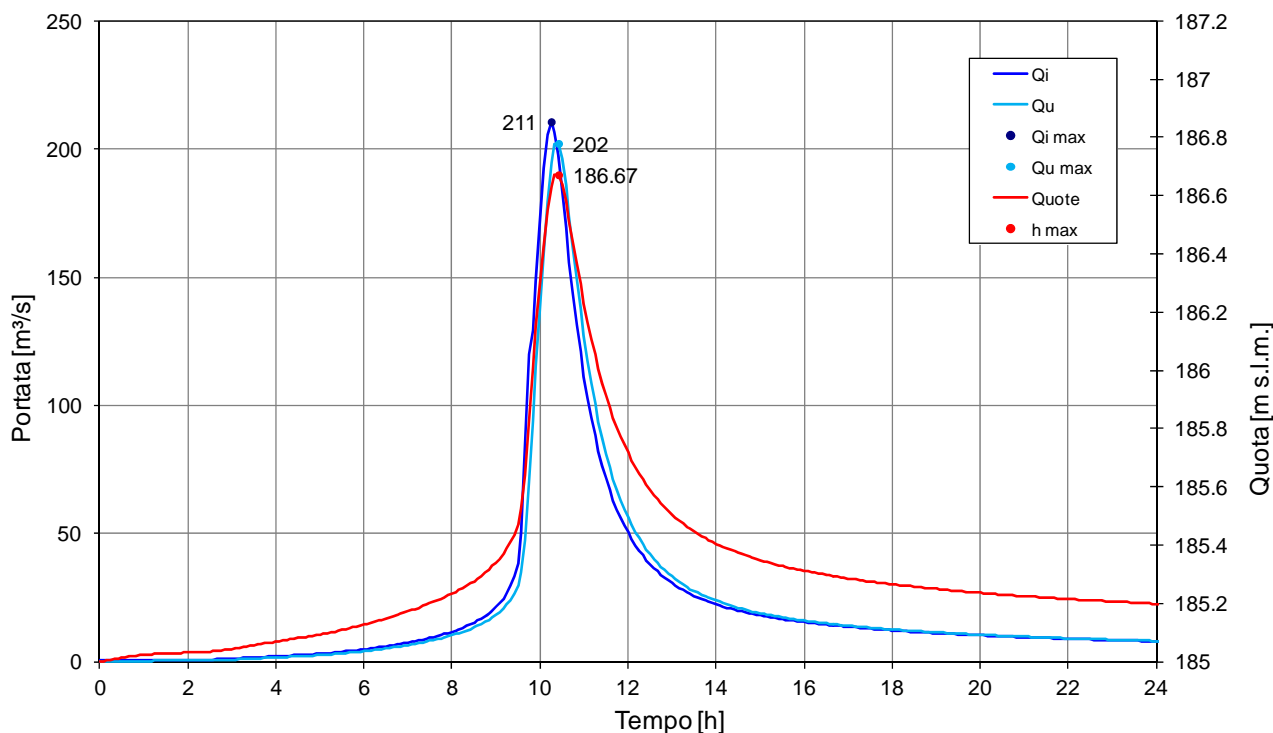


Figura 4-9 – Laminazione del serbatoio per $T_r = 1000$ anni nello stato di progetto.

4.3 ANNULLAMENTO DEL FRANCO IDRAULICO

I risultati delle verifiche condotte per gli eventi di piena con periodo di ritorno superiore a 1000 anni per l'individuazione dell'evento che annulla il franco idraulico sono riportati nella Tabella 4-7.

Tempo di ritorno [anni]	Portata in arrivo [m³/s]	Portata uscita totale [m³/s]	Portata uscita canale sinistra [m³/s]	Portata uscita canale destra [m³/s]	Quota livello inizio evento [m s.l.m.]	Quota livello fine evento [m s.l.m.]	Franco idraulico [m]
2000	245.89	240.59	139.07	101.52	185.0	186.85	2.147
5000	299.81	291.75	166.71	125.03	185.0	187.09	1.913
10000	347.07	336.09	191.68	144.42	185.0	187.31	1.690
20000	400.67	385.81	220.50	165.31	185.0	187.58	1.421
30000	435.31	417.61	239.32	178.29	185.0	187.76	1.238
40000	461.46	441.43	253.59	187.84	185.0	187.90	1.097
50000	482.76	460.76	265.26	195.50	185.0	188.02	0.979
60000	501.13	477.58	275.49	202.09	185.0	188.13	0.874
70000	517.22	492.38	284.53	207.85	185.0	188.22	0.780
80000	531.58	505.57	292.63	212.94	185.0	188.30	0.695
90000	544.55	517.40	299.92	217.48	185.0	188.38	0.618
100000	556.38	528.18	306.59	221.59	185.0	188.45	0.547
150000	604.00	571.22	333.40	237.82	185.0	188.74	0.257
200000	639.83	603.32	353.59	249.73	185.0	188.97	0.032
210000	646.08	608.90	357.12	251.79	185.0	189.01	-0.007
250000	668.86	629.15	369.94	259.20	185.0	189.15	-0.152

Tabella 4-7 – Portate evacuate e livelli di invaso per i periodi di ritorno superiori a 1000 anni.

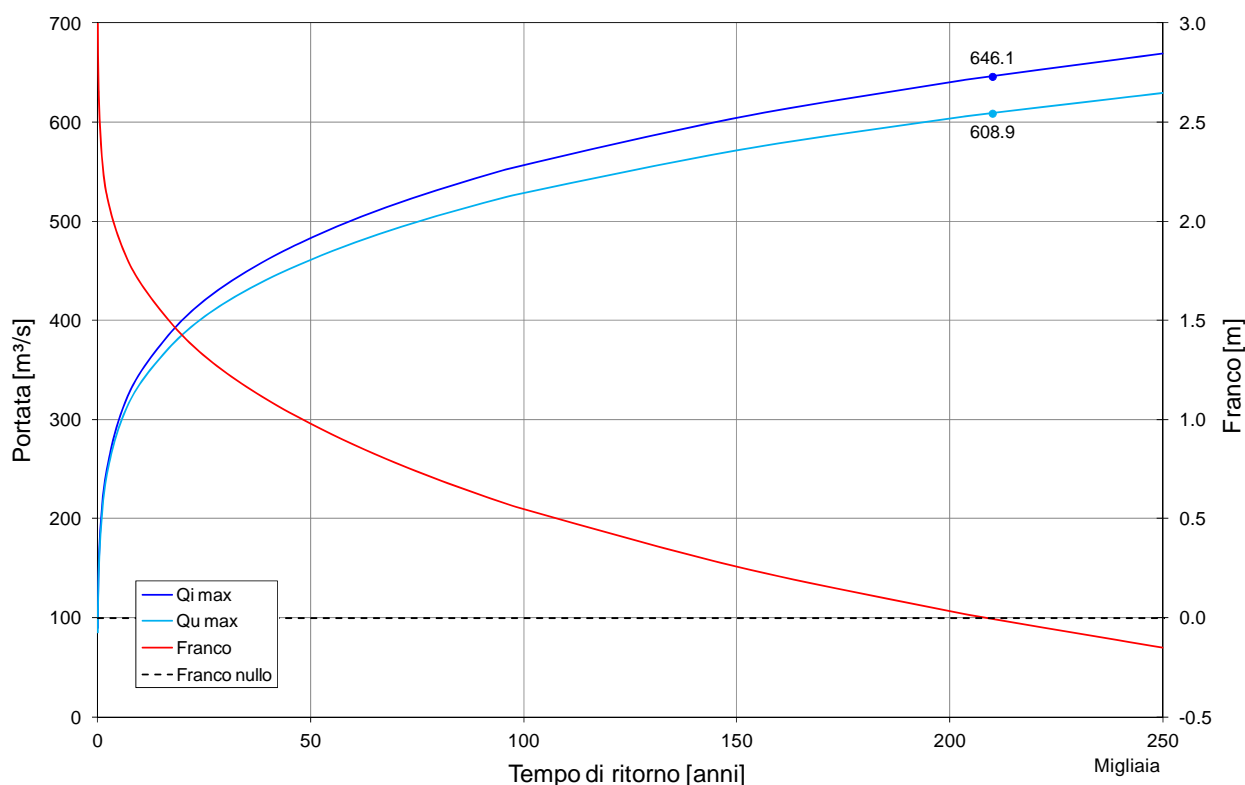


Figura 4-10 – Andamento del franco e della laminazione del serbatoio al variare del periodo di ritorno.

Nella Figura 4-10 è rappresentato l'andamento del franco idraulico al variare del periodo di ritorno. Il periodo di ritorno dell'evento che annulla il franco è di 210'000 anni.

4.4 VERIFICA DELLO SCARICO DI FONDO

Allo stato attuale lo scarico è realizzato con una condotta in acciaio del diametro di 400 mm sottopassante il corpo diga a circa 1.5 ÷ 2.0 m dal piano di fondazione, annegata in un getto di calcestruzzo diaframmato ogni 5 metri con uno sviluppo in lunghezza pari a 122.0 m.

Nella configurazione di progetto viene incrementata la lunghezza della condotta in seguito agli interventi di ricarica dei paramenti di monte e di valle della diga e al conseguente spostamento dei pozzetti di presa e di manovra. La lunghezza della condotta diviene pari a 134.5 m.

Nello stato di progetto è previsto, inoltre, l'esecuzione dei lavori di risanamento strutturale della tubazione in acciaio con sistema "C.I.P.P. - Blue Liner". Lo spessore portante della guaina dopo l'installazione è di soli 7 mm (misurazione secondo UNI EN ISO 11296-4).

La stima dei tempi di svuotamento è condotta partendo dalla quota di massima regolazione di progetto pari a 185.0 m s.l.m. a cui corrisponde un volume di invaso di circa 383'400 m³.

I tempi di svuotamento sono determinati mediante le curve di deflusso della tubazione di scarico. Le curve di deflusso sono determinate per n. 3 differenti scenari:

- tubazione in acciaio DN 400 nuova;
- tubazione in acciaio DN 400 attuale con incrostazioni;
- tubazione in acciaio DN 400 risanata con sistema "C.I.P.P. - Blue Liner".

La calza del sistema "C.I.P.P. - Blue Liner" è costituita da un rivestimento interno in Polietilene applicato su feltro con aggiunta di fibre di vetro, che crea una nuova condotta all'interno di quella esistente in grado di garantire la tenuta strutturale e idraulica con uno spessore di soli 9 mm, calcolato sulla base della norma ASTM F1216 e dei parametri di progetto.

Per la determinazione delle curve di deflusso della tubazione per i differenti scenari analizzati è impiegata la formula di *Darcy-Weisbach*:

$$J = \frac{\lambda U^2}{2Dg}$$

avendo indicato con J la perdita di carico per unità di lunghezza della condotta, con D il diametro della condotta, con U la velocità della corrente, con g l'accelerazione di gravità e con λ il coefficiente adimensionale di resistenza.

Il coefficiente λ è espresso, in condizione di moto assolutamente turbolento, in funzione della scabrezza omogenea equivalente del tubo:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log\left(\frac{3.71D}{\varepsilon}\right)$$

I valori della scabrezza omogenea equivalente ε utilizzati per il calcolo del coefficiente λ sono riportati nella Tabella 4-8.

Per il calcolo della perdita di carico totale, il valore della lunghezza della condotta è incrementata delle perdite di imbocco (20 m), delle perdite di sbocco (10 m) e delle perdite per l'attraversamento delle due saracinesche di monte e di valle (7+7 m).

Descrizione	ε [mm]
Tubi nuovi PE, PVC, PRFV	0.02
Tubi nuovi acciaio	0.05
Tubi con incrostazioni e depositi	0.80

Tabella 4-8 – Valori della scabrezza omogenea equivalente.

Nella Figura 4-11 sono riportate le curve di deflusso relative alla tubazione in acciaio DN 400 come nuova e con incrostazioni nella configurazione dello stato attuale, nonché quella valutata nella configurazione di progetto per la tubazione in acciaio DN 400 risanata con sistema "C.I.P.P. - Blue Liner".

Dall'analisi delle curve si evince che nella configurazione attuale, a partire dalla quota di massima regolazione, una tubazione in acciaio DN 400 nuova è in grado di svuotare l'invaso in 4.1 giorni e consente la vuotatura del 75% del volume di invaso in 2.9 giorni.

Allo stato attuale, per effetto delle incrostazioni all'interno della tubazione in acciaio, i tempi necessari per la completa vuotatura e per la vuotatura del 75% del volume di invaso aumentano rispettivamente di 1.5 e 1.2 giorni rispetto ai corrispondenti valori stimati per una condotta nuova in buone condizioni.

Il tempo necessario allo svuotamento dell'invaso diventa pari a 5.6 giorni, mentre per la vuotatura del 75% del volume di invaso occorrono 4.0 giorni.

L'intervento di risanamento proposto consente di ottenere, nella configurazione di progetto con la tubazione lunga 134.5 m, periodi temporali di svuotamento prossimi a quelli di una tubazione in acciaio nuova.

Infatti, il tempo necessario al completo svuotamento nello stato di progetto ammonta a circa 4.4 giorni (incremento di 8.0 ore), mentre il tempo per la vuotatura del 75% del volume di invaso è di 3.2 giorni (incremento di 8.0 ore).

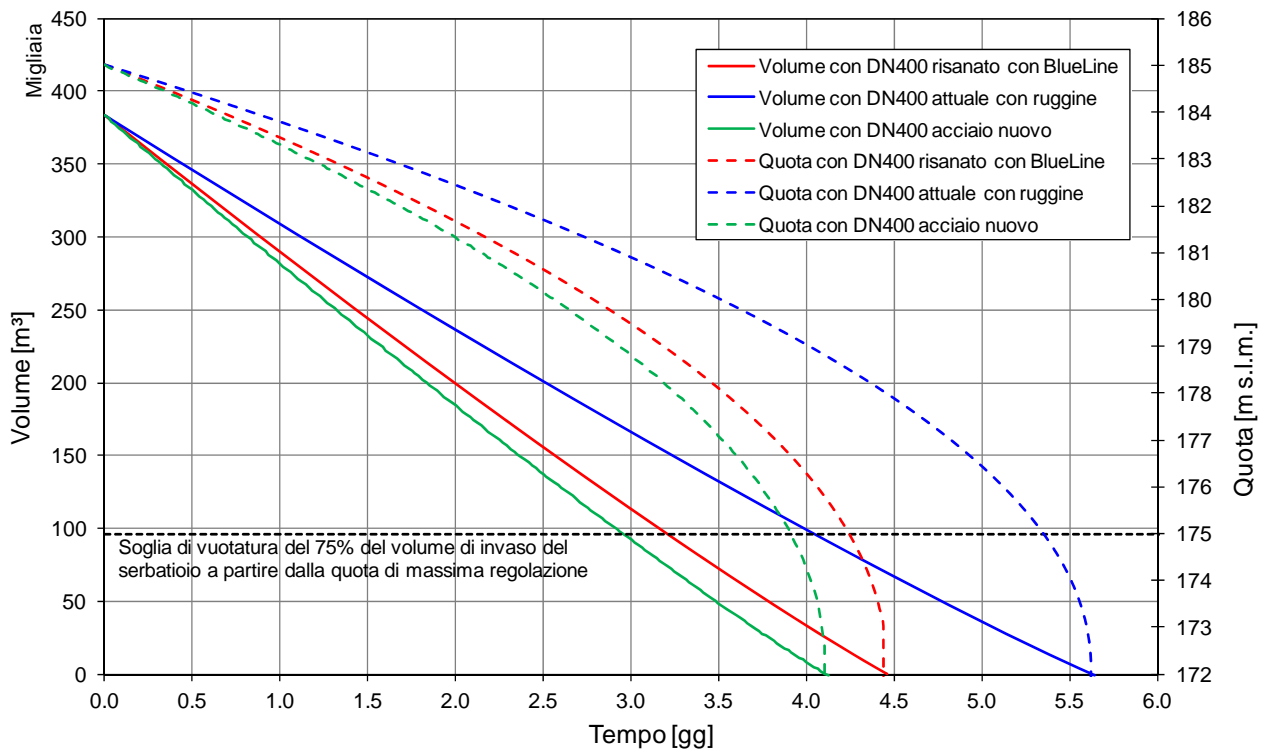


Figura 4-11 – Curve di deflusso per lo scarico esistente e per il nuovo.

A. APPENDICE

IL MODELLO IDROLOGICO

Il modello idrologico simula il processo di generazione e trasferimento dei deflussi attraverso la successione, per ciascuna cella e per tutti i passi temporali, delle seguenti fasi:

- intercettazione: in questa fase si effettua una stima della quantità di acqua che viene comunque sottratta al deflusso superficiale. La stima è riferita ad una componente iniziale che comprende le varie perdite per intercettazione (vegetazione, assorbimento del suolo) e ad una componente a regime riferita alla capacità di infiltrazione a saturazione.
- suolo: in questa fase si ricostruisce il bilancio idrologico del suolo, valutando la quantità d'acqua che va ad alimentare il volume profondo e la componente del deflusso ipodermico.
- canale: in questa fase si simula il trasferimento del deflusso superficiale e di quello ipodermico dalla singola cella alla sezione di chiusura.

Nella figura seguente si riporta uno schema del modello idrologico adottato.

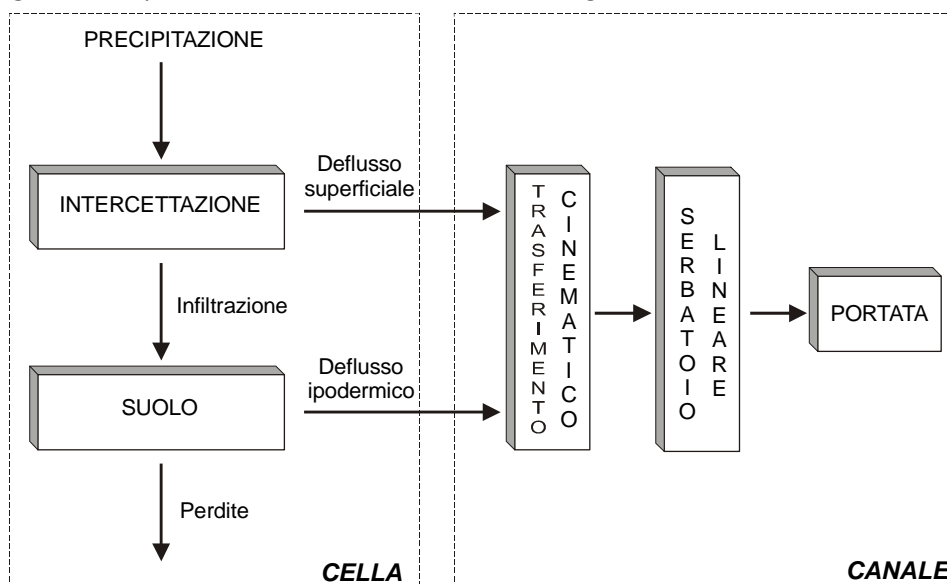


Figura A-1 – Schema del modello afflussi-deflussi.

All'inizio dell'evento di precipitazione una parte della pioggia si infiltra nel suolo, fino a saturare la capacità di ritenuta del suolo. Saturato tale volume, l'acqua continua a infiltrare nel suolo con un tasso definito dalla velocità di infiltrazione. Se l'afflusso eccede la velocità di infiltrazione si ha deflusso superficiale verso il canale. Tale deflusso contribuisce alla portata con un ritardo dettato dal modello di trasferimento.

Il bilancio del serbatoio "suolo" tiene pertanto conto da una parte dell'afflusso per infiltrazione, dall'altra delle perdite. Le perdite sono tali che per suolo saturo la quantità di acqua che si infiltra nel suolo sia pari alla velocità di infiltrazione.

La capacità di ritenuta in [mm], ovvero la quantità di acqua che può essere immagazzinata nella parte gravitazionale del suolo (corrisponde al grado di saturazione uguale a 1) e la velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h] che rappresenta la velocità di infiltrazione nel suolo in condizioni di saturazione (grado di saturazione uguale a 1) sono definite dalle mappe *raster* relative. Per quanto riguarda il deflusso ipodermico si assume che esso sia funzione della velocità di filtrazione a saturazione moltiplicata per un fattore 1000.

Passando all'algoritmo di calcolo, con riferimento alle variabili elencate nella tabella 9 si riportano di seguito i principali calcoli effettuati dal programma per ciascuna cella costituente il bacino:

1. l'afflusso sulla singola cella, P_{i_k} [mm/h];
2. il suolo è assimilato a un serbatoio lineare che si riempie in ragione della precipitazione (di intensità costante sul passo di bilancio) e si svuota in ragione della percolazione, K_s [mm/h], e del deflusso ipodermico regolato dal parametro K [1/h].
3. l'equazione di continuità, da cui si ricava il contenuto di acqua nel suolo da un passo a quello successivo, è esprimibile in forma differenziale nel seguente modo:

$$\Delta\theta = \theta_{k+1} - \theta_k = \left(P_i - K_s - K \cdot \frac{\theta_{k+1} + \theta_k}{2} \right) dt$$

$$\frac{\theta_{k+1}}{dt} + \frac{K}{2} \cdot \theta_{k+1} = \frac{\theta_k}{dt} - \frac{K}{2} \cdot \theta_k + P_i - K_s$$

$$\theta_{k+1} = \left(\frac{\left(\frac{1}{dt} - \frac{K}{2} \right) \theta_k + P_i - K_s}{\frac{1}{dt} + \frac{K}{2}} \right)$$

Il contenuto di acqua nel suolo all'inizio θ_0 [mm] è uguale a $\alpha_0 \theta_{\max}$, dove α_0 è il grado di saturazione iniziale. Il valore del contenuto di acqua nel suolo è limitato tra 0 e θ_{\max} , pertanto si possono distinguere tre casi:

- 1) essiccamento del suolo:

se $\theta_k / dt + P_{i_k} > K_s$ allora

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = \theta_k / dt + P_{i_k} - K_s$$

$$I_{\text{eff}} = K_s$$

altrimenti

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = 0$$

$$I_{\text{eff}} = \theta_k / dt + P_{i_k}$$

- 2) saturazione del suolo:

$$\theta_{k+1} = \theta_{\max}$$

$$Q_{1k} = (\theta_k - \theta_{\max}) / dt + P_{i_k} - K_s$$

$$I_{\text{eff}} = K_s$$

- 3) caso intermedio:

$$0 < \theta_{k+1} < \theta_{\max}$$

$$Q_{1k} = (\theta_k - \theta_{k+1}) / dt + P_{i_k} - K_s$$

$$I_{\text{eff}} = K_s$$

4. il modello di trasferimento nel reticolo è costituito da una componente di invaso e da una componente cinematica poste in serie. La componente di invaso è caratterizzata dalla seguente espressione:

$$\varphi_{k+1} = \left(\frac{\left(\frac{1}{dt} - \frac{C_s}{2} \right) \varphi_k + Q_{1k}}{\frac{1}{dt} + \frac{C_s}{2}} \right)$$

dove C_s [1/h] è il parametro del serbatoio calcolato come $1/\tau_i$ e φ_k il volume d'acqua nel reticolo (assunto inizialmente nullo). Il contributo verso la componente cinematica risulta:

$$Q_k = C_s \frac{\varphi_{k+1} + \varphi_k}{2}$$

5. la componente cinematica trasla nel tempo il contributo Q_k di un fattore pari a τ_c .

Il contributo complessivo alla sezione di chiusura avviene attraverso la convoluzione dei contributi delle singole celle.

Sulla base di quanto esposto, il modello necessita della definizione dei seguenti parametri:

- α_0 = frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale) [/];
- RI = coefficiente moltiplicativo del raster della capacità di ritenuta del suolo [/];
- IN = coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione [/];
- IP = coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica [/];
- MT = coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento [/];
- CI = coefficiente ripartizione cinematico-invaso [/].

Simbolo	Descrizione	U.I.
P_{ik}	valore dell'afflusso (precipitazione) per la singola cella al passo k-esimo	[mm/h]
Δt	passo temporale	[h]
Dx	passo spaziale	[m]
SC	valore della capacità di ritenuta del suolo (storage capacity)	[mm]
KL	valore della velocità di infiltrazione a saturazione	[mm/h]
RI	coefficiente moltiplicativo della capacità di ritenuta del suolo	[/]
IN	coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione	[/]
IP	coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica	[/]
T	valore dei tempi di trasferimento	[h]
$T_c = CI T$	valore dei tempi di trasferimento o di risposta secondo lo schema cinematico	[h]
$T_i = (1-CI) T/MT$	valore dei tempi di trasferimento secondo lo schema di trasferimento di invaso	[h]
MT	coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento	[/]
CI	coefficiente ripartizione cinematico-invaso	[/]
$\theta_{max} = RI SC$	valore distribuito della capacità di ritenuta massima del suolo (volume utile del suolo)	[mm]
$K_s = IN KL$	valore distribuito della velocità di infiltrazione a saturazione (o permeabilità)	[mm/h]
$\tau_c = T_c/MT$	valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo cinematico	[h]
$\tau_i = T_i/MT$	valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo dell'invaso	[h]
$C_{s=1/\tau_i}$	valore distribuito della costante di esaurimento del serbatoio lineare	[1/h]
α_0	frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale)	[/]
θ_0	contenuto di acqua nel suolo nello stato iniziale	[mm]
$K = IP(KL/SC)$	coefficiente di deflusso ipodermico	[1/h]
θ_k	contenuto di acqua nel suolo al passo k-esimo	[mm]
I_{eff}	Infiltrazione effettiva	[mm/h]
Q_{1k}	contributo verso il reticolo al passo k-esimo	[mm/h]
φ_k	volume d'acqua invasata nel reticolo	[mm]
Q_k	contributo alla foce passo k-esimo	[mm/h]

Tabella A-1 – Elenco della variabili utilizzate dal modello afflussi-deflussi.

LE PRECIPITAZIONI

L'input di precipitazione, in termini di ietogramma, può essere definito sulla base delle curve di possibilità pluviometrica (CPP) adottando un particolare ietogramma di intensità variabile, noto in letteratura scientifica come *ietogramma Chicago*.

Lo ietogramma Chicago prevede la seguente formulazione per la parte antecedente e successiva al picco di intensità della precipitazione:

$$i(t) = n(aT^m) \left(\frac{t_b}{r} \right)^{n-1} \quad \text{per } t \leq t_p$$

$$i(t) = n(aT^m) \left(\frac{t_a}{(1-r)} \right)^{n-1} \quad \text{per } t > t_p$$

dove:

- a, n, m parametri della CPP ($h = a d^n T^m$);
- T tempo di ritorno (anni) prescelto per l'evento;
- t tempo dall'inizio dell'evento;
- t_p tempo di picco;
- t_b tempo mancante al verificarsi del picco;
- t_a tempo trascorso dal verificarsi del picco;
- d durata dell'evento;
- r fattore di fase (determina la posizione temporale del picco).

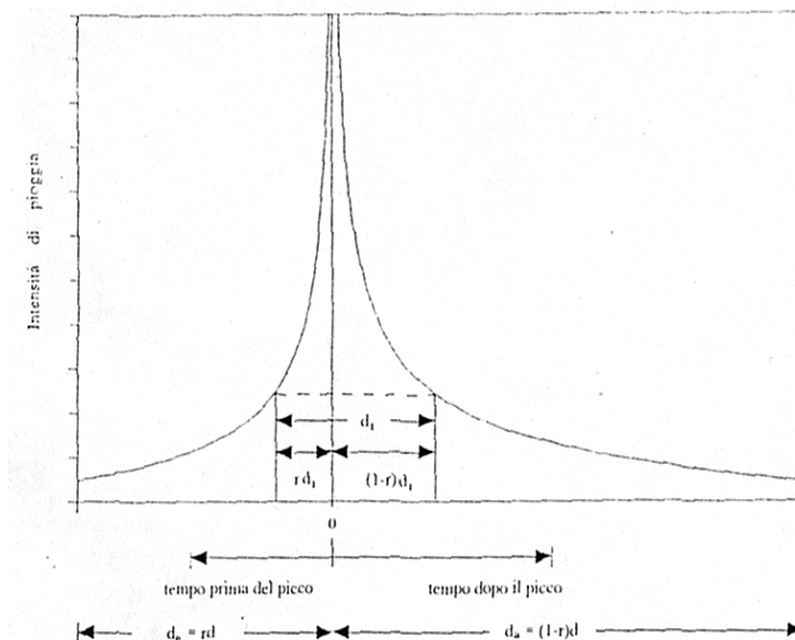


Figura A-2 – Schema dello ietogramma Chicago.

La particolarità di questo ietogramma (che è anche la sua comodità), è quello di racchiudere al suo interno, per tutte le durate minori di quella complessiva t_b , eventi congruenti con la CPP, e quindi di sollecitare sicuramente in modo critico il bacino di volta in volta considerato.

La variabilità spatio-temporale della precipitazione è messa in conto attraverso un *coefficiente di ragguglio areale* K_r del tipo:

$$K_r = h_A(A, t) / h(t)$$

dove $h_A(A, t)$ è l'altezza di pioggia di durata t raggugliata all'area A e $h(t)$ l'altezza di pioggia di durata t nel centro di scroscio.

Il valore di K_r dipende da tre fattori:

- l'estensione dell'area investita dalla precipitazione;
- la durata considerata;
- l'altezza di pioggia.

Per la quantificazione di K_r si è fatto riferimento alla formula dell'USWB:

$$K_r = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) + \exp(-\alpha t^\beta - \gamma A)$$

dove α , β e γ sono i parametri della formula, t [h] la durata della precipitazione e A [km²] l'area del bacino.

I parametri di *default* sono i seguenti:

- $\alpha = 0.036 a$, dove a è il parametro della CPP;
- $\beta = 0.25$;
- $\gamma = 0.01$.

L'applicazione del coefficiente di ragguglio areale allo ietogramma di tipo Chicago è condotta applicando la formula separatamente a ciascun intervallo di tempo a cavallo del picco di pioggia in modo da modificare la forma dello ietogramma di progetto in funzione dell'area del bacino a cui questo viene applicato.

Una tale applicazione consente di modificare automaticamente la forma dello ietogramma in considerazione del fatto che le piogge raggugliate per bacini piccoli mantengono alti valori di intensità che poi diminuiscono all'aumentare della dimensione del bacino fino a divenire assimilabili a precipitazioni di intensità costante per grandi bacini.

TABULATI ANALISI IDROLOGICHE

Est UTM WGS84 32N	Nord UTM WGS84 32N	Area bacino [km ²]	Tempo ritorno [anni]	Durata [h]	Grado saturaz.	Rapporto cinem./inv.	Fa	Fb	Fc	Molt. infiltraz.	Molt. ritenuta	Tempo ritardo [h]	Portata [m ³ /s]	Precipitaz. [mm]	Deflusso [mm]	Coeff. ragguaglio	Deflusso unitario [m ³ /s km ²]
679589	4818502	11.36	30	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	89.8	115.49	76.04	0.987	7.91
679589	4818502	11.36	50	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	102.6	126.90	86.30	0.987	9.03
679589	4818502	11.36	100	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	122.3	144.21	102.09	0.987	10.77
679589	4818502	11.36	200	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	145.0	163.87	120.30	0.987	12.76
679589	4818502	11.36	500	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	180.2	194.04	148.61	0.987	15.86
679589	4818502	11.36	1000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	211.2	220.50	173.71	0.987	18.59
679589	4818502	11.36	2000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	246.5	250.57	202.46	0.987	21.70
679589	4818502	11.36	5000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	300.6	296.70	247.17	0.987	26.46
679589	4818502	11.36	10000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	347.9	337.16	287.09	0.987	30.63
679589	4818502	11.36	20000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	401.6	383.13	332.45	0.987	35.36
679589	4818502	11.36	30000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	436.4	412.88	361.80	0.987	38.41
679589	4818502	11.36	40000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	462.6	435.38	384.00	0.987	40.72
679589	4818502	11.36	50000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	483.9	453.67	402.05	0.987	42.60
679589	4818502	11.36	60000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	502.3	469.18	417.35	0.987	44.22
679589	4818502	11.36	70000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	518.5	482.71	430.71	0.987	45.64
679589	4818502	11.36	80000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	532.8	494.74	442.58	0.987	46.91
679589	4818502	11.36	90000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	545.9	505.61	453.30	0.987	48.05
679589	4818502	11.36	100000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	557.7	515.53	463.10	0.987	49.09
679589	4818502	11.36	150000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	605.4	555.56	502.59	0.987	53.30
679589	4818502	11.36	200000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	641.4	585.83	532.45	0.987	56.46
679589	4818502	11.36	210000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	647.6	591.13	537.68	0.987	57.01
679589	4818502	11.36	250000	24.0	1.0	0.45	0.036	0.25	0.01	1.0	1.0	0.86	670.4	610.44	556.74	0.987	59.02

Tabella A-2 – Portate al colmo per la durata di 24 ore per i vari tempi di ritorno aggiornate con le LSPP.