

ACCORDO DI COLLABORAZIONE

tra

Agenzia Regionale del Distretto Idrografico della Sardegna

e

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura
dell'Università degli Studi di Cagliari**

Finalizzato alla predisposizione del Piano di Gestione del Rischio di alluvioni sui principali corsi d'acqua del distretto idrografico della Regione Autonoma della Sardegna, ai sensi dell'art. 7 della Direttiva 2007/60/CE in data 23.10.2007 e dell'art. 7 del Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n. 49

Bacino del Fiume Cedrino

ALLEGATO

5.15.CE.R7.0

**Relazione sulla Laminazione
Invaso diga di Pedra e'Othoni**

Responsabile Scientifico per DICAAR

Prof. Giovanni Maria Sechi

Elaborazioni

Ing. Riccardo Zucca

Cagliari, Giugno 2016



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

Indice

1	Premessa	3
2	La diga Pedra e'Othoni sul fiume Cedrino	5
2.1	Descrizione generale dell'opera	5
2.2	Organi di scarico	8
2.2.1	Scarico di fondo	8
2.2.2	Scarico di superficie a quota 100 m s.l.m.	8
2.2.3	Scarico di superficie a quota 110 m s.l.m.	8
2.2.4	Scarico di superficie a quota 115 m s.l.m.	8
2.2.5	Portata effluente dagli scarichi alle differenti quote d'invaso	9
3	Regole operative per la gestione dell'invaso.....	12
4	Modellazione del sistema	14
4.1	WARGI-SIM: Decision Support Systems per la simulazione di sistemi idrici	14
4.2	Il sistema idrico del Cedrino	15
4.2.1	Quadro della domanda.....	15
4.2.2	Input idrologici.....	17
4.2.3	Evaporazione dagli invasi.....	18
4.3	Scenari di simulazione	19
4.3.1	Risultati ottenuti	20
4.3.2	Modifica degli input idrologici – Serie SISS-2	23
5	Laminazione dell'onda di piena nell'invaso del Cedrino	28
5.1	Considerazioni preliminari.....	28
5.2	Risultati della procedura di laminazione dell'invaso del Cedrino	30
5.3	Propagazione dell'onda laminata a valle.....	33
5.4	Tempo di intervento	37
6	Considerazioni conclusive.....	38

Allegato A – Procedura di calcolo dell'idrogramma triangolare

Allegato B – Sintesi della procedura analitica di simulazione del processo di laminazione nell'invaso

Allegato C – Tabelle con valori discreti di portata laminata e di livello d'invaso con passo temporale di 15'



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

1 Premessa

Nell'ambito delle attività previste dall'accordo di collaborazione del Marzo 2014 tra l'Agenzia di Distretto Idrografico della Sardegna (ARDIS) e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura (DICAAR) dell'Università di Cagliari per la predisposizione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), all'Art. 3 (Obiettivi e attività) è richiamata la necessità di esaminare l'effetto di laminazione delle piene per opera degli invasi. Infatti, per quanto concerne gli "interventi non strutturali" del PGRA, demandati alle Regioni in coordinamento con il Dipartimento nazionale della protezione civile, (D.Lgs. n. 49/2010 - art. 7 comma 5), è previsto che si sviluppi una fase di analisi al fine di predisporre una "sintesi dei contenuti dei piani urgenti di emergenza predisposti ai sensi dell'articolo 67, comma 5, del Decreto Legislativo n. 152 del 2006, nonché della normativa previgente e tengano conto degli aspetti relativi alle attività di ..." (punto c) "regolazione dei deflussi posta in essere anche attraverso i piani di laminazione".

Nello stesso accordo, tra ARDIS e DICAAR, è anche detto che modelli di simulazione idraulica predisposti nell'ambito del Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF)¹ hanno già tenuto in considerazione l'effetto della laminazione effettuata dai bacini artificiali esistenti sui valori al colmo delle portate di piena per i diversi tempi di ritorno considerati. Pertanto, al fine di valutare nel PGRA gli interventi strutturali di protezione per le aree a rischio presenti nei tratti a valle dei bacini artificiali, sono state di norma utilizzate dal DICAAR le portate al colmo laminate definite nell'ambito del PSFF.

Tuttavia, nello stesso Accordo, è puntualizzato che, "qualora successivamente alla pianificazione già svolta siano intervenute o siano in progetto delle modifiche delle regole operative di gestione degli invasi, ai sensi dell'art. 7 comma 5 del D.Lgs. n. 49/2010, ovvero siano stati realizzati interventi strutturali nelle opere di sbarramento e/o di modifica delle opere di scarico" dovranno essere aggiornate le valutazioni già condotte. Di seguito, nell'Accordo è puntualizzato che la "fase di aggiornamento sarà realizzata sulla base delle indicazioni sulle modifiche delle regole gestionali e delle portate scaricate a valle degli sbarramenti, che saranno fornite da ARDIS e dagli Enti gestori degli invasi".

In tempi più recenti, sulla base delle decisioni assunte dal Tavolo Tecnico sui Piani di Laminazione nelle riunioni del 26 Ottobre 2015 e del 10 Febbraio 2016, con nota dell'Agenzia in data 16 Febbraio 2016, il DICAAR è stato invitato a partecipare alle riunioni del Tavolo Tecnico al fine di offrire supporto tecnico-scientifico nella predisposizione dei Piani di Laminazione. D'altra parte, questa attività era già stata prevista nell'aggiornamento del Programma dell'accordo tra ARDIS e DICAR, del Novembre 2015, per il completamento della fase finale del PGRA. In questo documento, al punto 2, è infatti previsto che il DICAAR fornisca supporto scientifico al "Tavolo Tecnico con il compito di coordinare le attività di redazione dei piani di laminazione contenenti le azioni di regolazione dei deflussi dalle dighe nel corso di eventi di piena [...] predisposti dalla struttura della Regione responsabile del governo delle piene, con il concorso tecnico dei Centri Funzionali decentrati, dell'Autorità di bacino e del Registro italiano dighe, d'intesa con i gestori, sotto il coordinamento del Dipartimento della protezione civile, prefigurando diversi e possibili scenari d'evento per ciascuna diga e prevedendo le misure e le procedure da adottare tenendo in buon conto sia la mitigazione degli effetti a valle dell'invaso, sia la sicurezza delle opere, sia l'esigenza di utilizzazione dei volumi invasati".

¹ Studi, indagini, elaborazioni attinenti all'ingegneria integrata, necessari alla redazione dello Studio denominato Progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (P.S.F.F.). Regione Autonoma della Sardegna



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

Sulla base di queste premesse, di seguito si illustrano le analisi effettuate dal DICAAR nella predisposizione di un documento che possa essere di supporto alla redazione dei *“Piani di laminazione statica, anche speditivi”*, così come definiti sulla base delle decisioni assunte dal Tavolo Tecnico nella riunione del 10 Febbraio 2016 e riportate nel documento in data 16 Febbraio 2016, prot. n. 0001522 dell’Agenzia di Distretto Idrografico.

Nello stesso documento sono indicate le seguenti 11 dighe alle quali è connesso il *“rischio idraulico a valle”*:

1. Muzzone (fiume Coghinas);
2. Nuraghe Arrubiu (fiume Flumendosa);
3. Cantoniera (fiume Tirso);
4. Is Barroccus (fiume Flumini Mannu);
5. Monte Crispu (fiume Temo);
6. Monteleone Roccadoria (fiume Temo);
7. Nuraghe Pranu Antoni (fiume Tirso);
8. Casteldoria (fiume Coghinas);
9. Maccheronis (fiume Posada);
10. Pedra ‘e Othoni (fiume Cedrino);
11. Genna Is Abis (fiume Cixerri).

Nelle prime riunioni del Tavolo Tecnico si è inoltre concordato di predisporre in via prioritaria i Piani per le dighe di Maccheronis e di Pedra ‘e Othoni.

Pertanto, nella presente relazione è analizzato l’invaso sotteso dalla diga di Pedra e’Othoni sul fiume Cedrino. Si forniscono preliminarmente alcuni elementi descrittivi dello sbarramento e dell’invaso. Quindi, si documentano le analisi effettuate tramite modelli di simulazione sia al fine della verifica della capacità di regolazione dell’invaso ai fini del soddisfacimento delle utenze connesse, sia in relazione alla entità della laminazione operata dall’invaso con diverse ipotesi di limitazione della quota idrica all’inizio dell’evento di piena e con differenti ipotesi sulla sua entità, basati sulla attribuzione del tempo di ritorno atteso.



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

2 La diga Pedra e' Othoni sul fiume Cedrino

2.1 DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA

La diga di Pedra e' Othoni sul fiume Cedrino, in territorio di Dorgali (NU), è del tipo in scogliera di pietrame omogenea con manto di tenuta in ferro puro Armco. Lo sbarramento è stato realizzato nei primi anni '60 per proteggere il territorio a valle dalle piene del corso d'acqua. L'opera è stata inizialmente concepita come diga di sola laminazione per trasformarsi, successivamente, anche in diga di regolazione per usi potabili, irrigui ed industriali. L'opera appartiene al Sistema Idrico Multisetoriale Regionale (SIMR) gestito dall'Ente Acque della Sardegna (Enas).

La diga è alta 81.7 m, con livello di massima regolazione pari a 103 m s.l.m. e livello di massimo invaso 127.5 m s.l.m. Il volume totale di invaso del serbatoio risulta pari a 117 Mm³, il volume utile di regolazione 16 Mm³ e il volume di laminazione 97 Mm³.



Figura 2.1 – Vista diga da monte (fonte www.enas.sardegna.it)

L'opera è dotata di 3 scarichi di superficie in sponda destra posti a quote differenti, di uno scarico di fondo in sponda sinistra e di due opere di presa: una potabile in sponda sinistra e una irrigua-industriale in sponda destra.



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

In anni più recenti lo scarico di superficie posto a quota minore è stato oggetto di lavori di adeguamento che hanno realizzato l'abbassamento della soglia da 103.00 m s.l.m. a 100.00 m s.l.m. e l'installazione di una paratoia a ventola di altezza 3 metri che consente di portare comunque l'invaso fino alla quota originaria di massima regolazione.

I lavori si sono resi necessari per dotare la diga di un organo di scarico capace di smaltire le portate delle piene ordinarie che, quando il livello di invaso supera quota 103.8 m s.l.m., causano la sommersione delle sorgenti di Su Gologone e la conseguente interruzione del servizio idrico potabile per i comuni di Oliena e Dorgali. Per ovviare a tale problema in passato si procedeva all'utilizzo dello scarico di fondo, operazione delicata e non opportuna con uso frequente. Attualmente la paratoia viene mantenuta sollevata durante la stagione estiva al fine di garantire la massima regolazione e viene completamente abbattuta durante la stagione invernale.

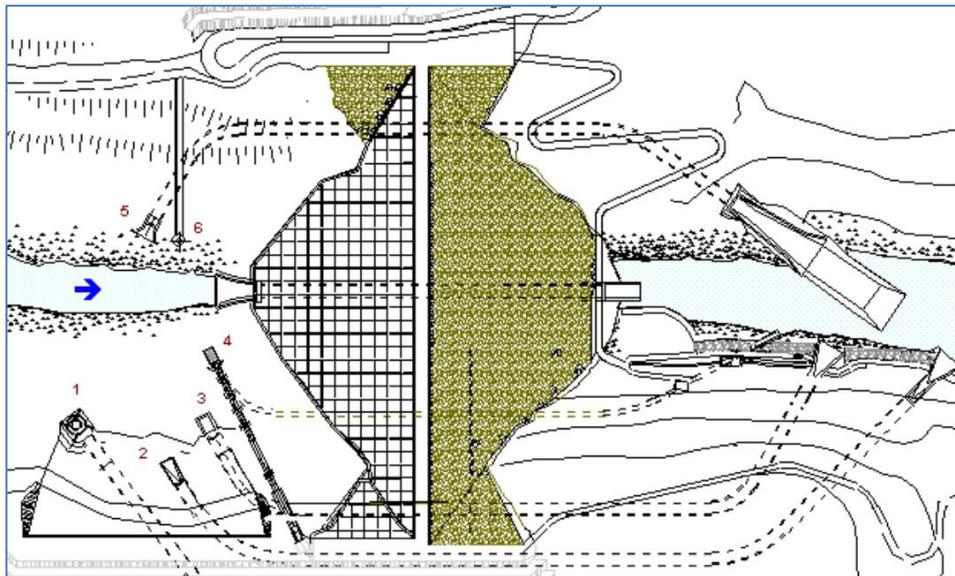


Figura 2.2 – Planimetria della diga di Pedra 'e Othoni

Legenda Figura 2.2²:

1. Scarico di superficie a quota 110 m s.l.m.
2. Scarico di superficie a quota 115 m s.l.m.
3. Scarico di superficie a quota 100/103 m s.l.m.
4. Opera di presa irrigua-idroelettrica
5. Scarico di fondo
6. Torre di presa potabile

² Relazione illustrativa. Gli eventi di piena del dicembre 2004. Consorzio di Bonifica Sardegna Centrale



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

Le caratteristiche principali dell'opera sono riassunte in Tabella 2.1³. In Figura 2.3 si fornisce la curva d'invaso del serbatoio.

Tabella 2.1 – Caratteristiche della diga di Pedra 'e Othoni

Altezza sbarramento	81.70 m
Sviluppo coronamento	301.00 m
Quota coronamento	129.70 m s.l.m.
Quota di massimo invaso	127.50 m s.l.m.
Quota massima regolazione	103.00 m s.l.m.
Quota minima regolazione	85.00 m s.l.m.
Volume totale di invaso	117.18 x 10 ⁶ m ³
Volume utile di regolazione	16.03 x 10 ⁶ m ³
Volume di laminazione	97.13 x 10 ⁶ m ³

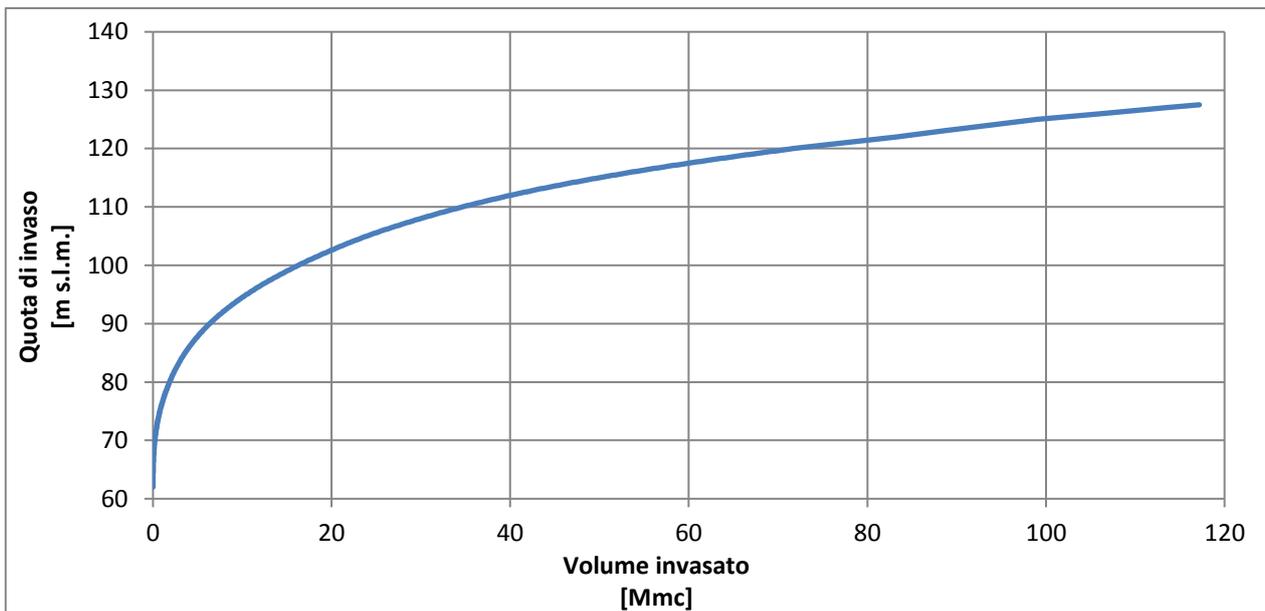


Figura 2.3 – Curva di invaso lago del Cedrino

³ Foglio di condizioni per l'esercizio e la manutenzione della diga di Pedra 'e Othoni. Direzione Generale per le Dighe, le Infrastrutture Idriche ed Elettriche. Ufficio Tecnico per le Dighe di Cagliari.



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

2.2 ORGANI DI SCARICO

2.2.1 SCARICO DI FONDO

Lo scarico di fondo è costituito da una galleria a sezione circolare in sponda sinistra, del diametro di 6 m con soglia di imbocco a quota 59.90 m s.l.m.

La portata scaricabile con livello del serbatoio pari alla quota di massimo invaso a 127.50 m s.l.m. è di 365 m³/s.

2.2.2 SCARICO DI SUPERFICIE A QUOTA 100 M S.L.M.

Come illustrato in precedenza, la soglia originaria dello scarico era posta a quota 103 m s.l.m. con larghezza pari a 6 metri, integrata da un'ulteriore soglia a forma di "U" a quota 105 m s.l.m.

Lo scarico è stato quindi modificato portando la soglia a quota 100 m s.l.m. con una luce pari a 18 metri, dotata di paratoia a ventola di altezza 3 metri. Lo scarico è altresì caratterizzato dalla presenza di due sfioratori liberi laterali con soglia a quota 103 m s.l.m. della larghezza di 10 metri ciascuno. Il manufatto di sfioro recapita in una galleria di scarico a sezione policentrica, avente diametro fondamentale di 6.00 m.

Al superamento della quota di 103 m s.l.m. la paratoia viene automaticamente abbattuta, a seguito di lettura del livello d'invaso da parte di un sensore.

La portata scaricabile con livello del serbatoio alla quota di massimo invaso 127.50 m s.l.m. è di 618 m³/s.

2.2.3 SCARICO DI SUPERFICIE A QUOTA 110 M S.L.M.

Lo scarico, ubicato in sponda destra, è costituito da un pozzo verticale in cemento armato di 10 metri di diametro nel quale si aprono quattro bocche di immissione contrapposte simmetriche e opportunamente sagomate, ciascuna dell'altezza di 1.85 metri con soglia a quota 110.00 m s.l.m. Il pozzo è collegato ad una galleria a sezione policentrica con diametro fondamentale di 6.60 m.

Alla quota di massimo invaso la portata esitabile è pari a 475 m³/s.

2.2.4 SCARICO DI SUPERFICIE A QUOTA 115 M S.L.M.

Lo scarico, anch'esso ubicato in sponda destra, è costituito da un'opera con soglia di imbocco a pianta mistilinea trapezoidale compresa tra 115 m s.l.m. e 116.50 m s.l.m., recapitante in una galleria di scarico a sezione circolare di diametro 4.80 metri.

Alla quota di massimo invaso la portata scaricabile è di 362 m³/s.



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA



Figura 2.4 – Vista scarichi di superficie nella configurazione antecedente i lavori di modifica dello scarico inferiore (posto sulla sinistra)



Figura 2.5 – Vista scarichi di superficie nella configurazione attuale

2.2.5 PORTATA EFFLUENTE DAGLI SCARICHI ALLE DIFFERENTI QUOTE D'INVASO

Di seguito si riporta la tabella presente nel Foglio Condizioni in cui sono presenti le portate effluenti dagli scarichi in funzione dei livelli di invaso. Quindi, in Figura 2.6 si riporta il grafico della portata in uscita dai differenti scarichi e il suo valore complessivo.

Tabella 2.2 – Portata effluente dagli scarichi alle differenti quote d'invaso

Livello d'invaso	Scarico di fondo	Scarico di superficie a quota 100 m s.l.m.	Scarico di superficie a quota 110 m s.l.m.	Scarico di superficie a quota 115 m s.l.m.	TOTALE
m s.l.m.	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
60	0	0	0	0	0
65	88	0	0	0	88
70	134	0	0	0	134
75	137	0	0	0	137
80	195	0	0	0	195
85	220	0	0	0	220



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

Livello d'invaso	Scarico di fondo	Scarico di superficie a quota 100 m s.l.m.	Scarico di superficie a quota 110 m s.l.m.	Scarico di superficie a quota 115 m s.l.m.	TOTALE
m s.l.m.	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
90	242	0	0	0	242
95	262	0	0	0	262
100	280	0	0	0	280
100.5	281	13	0	0	294
101	284	36	0	0	320
101.5	286	65	0	0	351
102	287	101	0	0	388
102.5	289	140	0	0	429
103	291	184	0	0	475
103.5	293	259	0	0	552
104	295	321	0	0	616
104.5	296	407	0	0	703
105	298	456	0	0	754
105.5	300	460	0	0	760
106	301	465	0	0	766
107	305	472	0	0	777
108	308	481	0	0	789
109	311	489	0	0	800
110	314	497	0	0	811
110.5	316	501	20	0	837
111	318	505	56	0	879
111.5	319	508	106	0	933
112	321	512	161	0	994
112.5	322	516	225	0	1063
113	324	520	275	0	1119
113.5	326	523	309	0	1158
114	327	527	322	0	1176
115	330	534	340	0	1204
115.5	332	538	348	7	1225
116	333	541	355	29	1258
116.5	335	545	362	68	1310
117	336	548	368	123	1375
117.5	338	552	373	194	1457
118	339	555	379	272	1545
118.5	341	559	384	325	1609
119	342	562	389	327	1620
120	345	569	400	332	1646
122.5	352	586	426	342	1706
125	360	602	451	352	1765
127.5	365	618	475	362	1820
129.7	373	632	494	370	1869

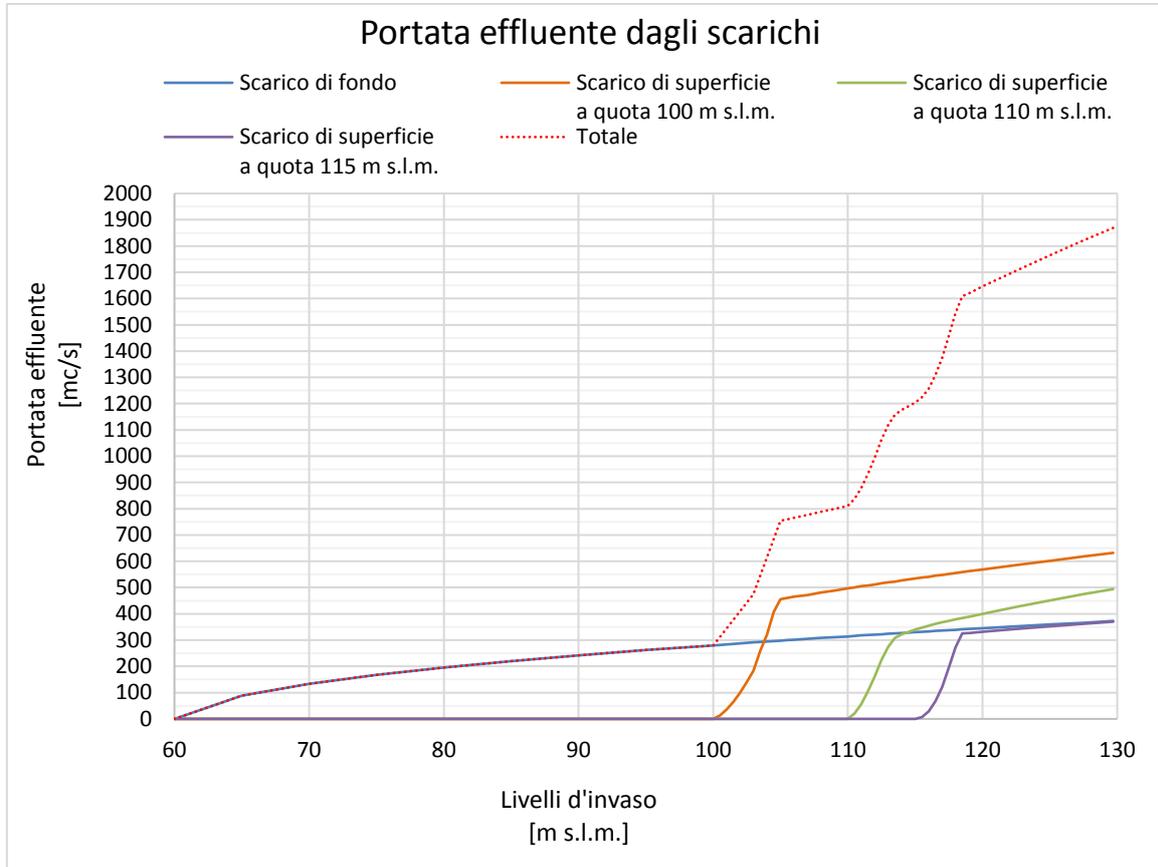


Figura 2.6 – Portata effluente dagli scarichi



3 Regole operative per la gestione dell'invaso

Nelle simulazioni del sistema di approvvigionamento che utilizza l'invaso come risorsa di riferimento è stata assegnata la priorità massima all'utenza civile, si considera di seguito, in ordine di priorità, l'utenza industriale e si assegna la priorità inferiore all'utenza irrigua.

Come descritto in precedenza, nello stato attuale la paratoia dello scarico di superficie a quota 100 m s.l.m. viene mantenuta sollevata durante la stagione primaverile - estiva (da marzo a settembre) al fine di garantire la massima regolazione e viene completamente abbattuta durante la stagione autunnale - invernale (da ottobre a febbraio) per evitare, anche in occasione di piene ordinarie, l'innalzamento del livello del lago oltre quota 103.8 m s.l.m. che causerebbe la sommersione delle sorgenti di Su Gologone, ubicate a monte dell'opera di sbarramento.

In sede di Tavolo Tecnico si è richiesto di verificare l'efficacia sulla laminazione e l'influenza sul soddisfacimento delle utenze collegate all'invaso nell'ipotesi che si consideri una ulteriore limitazione d'invaso nel periodo da ottobre a gennaio. La quota di invaso, da non superare in tale periodo, è stata valutata in modo tale da assicurare un volume invasato pari a circa il doppio della richiesta annuale dell'utenza idropotabile servita, ovvero pari a 96 m s.l.m. cui corrisponde un volume utile di regolazione pari a 7.7 Mm³, con riduzione rispetto alla quota di 100 m s.l.m. di 4,3 Mm³. Occorre rilevare che per garantire tale livello sarà necessario l'utilizzo dello scarico di fondo, che per tale opera risulta, allo stato attuale, un'operazione delicata e non facilmente attuabile.

Si è comunque deciso di analizzare tale scenario gestionale e confrontarlo con l'attuale sia dal punto di vista della regolazione dell'invaso ai fini del soddisfacimento della domanda sia della capacità di laminazione delle piene.

Pertanto, sono stati considerati due scenari di simulazione, descritti in Tabella 3.1:

- scenario A: simulazione del sistema con le attuali regole gestionali;
- scenario B: simulazione del sistema con modifica delle attuali regole gestionali, inserendo limiti di invaso ipotizzati nell'ambito dei lavori del Tavolo Tecnico.

Tabella 3.1 – Scenari di simulazione

Mese	Scenario A			Scenario B		
	Quota	Volume d'invaso	Volume utile di regolazione	Quota	Volume d'invaso	Volume utile di regolazione
Ottobre	100 m s.l.m.	16 Mm ³	12 Mm ³	96 m s.l.m.	11.7 Mm ³	7.7 Mm ³
Novembre						
Dicembre						
Gennaio						
Febbraio						
Marzo	103 m s.l.m.	20 Mm ³	16 Mm ³	103 m s.l.m.	20 Mm ³	16 Mm ³
Aprile						
Maggio						
Giugno						
Luglio						
Agosto						
Settembre						



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

I due scenari si differenziano esclusivamente per la gestione dell'invaso nel periodo da ottobre a gennaio: con lo scenario B si ha una maggiore limitazione nel volume d'invaso autorizzato durante la stagione autunnale e di inizio inverno al fine di ottenere un incremento del volume di laminazione, seppure a discapito del volume di regolazione. La giustificazione di tale ipotesi è anche da porre in relazione ai significativi apporti idrologici previsti all'invaso anche nei mesi successivi che dovrebbe consentire di non penalizzare le utenze servite.

Nei paragrafi seguenti i due scenari sono stati analizzati sia in termini di modellazione del sistema di approvvigionamento idrico facente capo all'invaso del Cedrino, ai fini della verifica del soddisfacimento delle utenze utilizzando il software di simulazione WARGI-SIM, sia in termini di potenzialità di laminazione delle piene, considerando nel modello di simulazione i differenti livelli come quota iniziale d'invaso all'accadimento di eventi di piena con criticità caratterizzata dai differenti tempi di ritorno.



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

4 Modellazione del sistema

4.1 WARGI-SIM: DECISION SUPPORT SYSTEMS PER LA SIMULAZIONE DI SISTEMI IDRICI

A partire dai primi anni '60 i modelli di simulazione sono stati ampiamente utilizzati nell'ambito dell'analisi dei sistemi complessi di risorse idriche. Esempi di recenti applicazioni in questo settore includono, tra le altre, AQUATOOL (Universidad Politecnica de Valencia; Andreu et al., 1996)⁴, WARGI-SIM (Università degli Studi di Cagliari; Sechi e Zuddas, 2000)⁵; MODSIM (Colorado State University; Labadie et al., 2000)⁶, RAISON (National Water Research Institute Environment of Canada; Young et al., 2000)⁷, HEC-ResSim (U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center; USACE, 2003)⁸, RiverWare (Center of Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems, University of Colorado at Boulder; Zagona et al., 2001)⁹, WaterWare (Environment Software and Services, Austria; Jamieson and Fedra, 1996)¹⁰, WEAP (Stockholm Environmental Institute; SEI, 2005)¹¹.

In termini generali, i Decision Support Systems (DSS) per i sistemi idrici utilizzano la simulazione come tecnica di riferimento per l'analisi del comportamento del sistema reale costruendo, per via numerica e con l'uso di software specificamente sviluppato, un modello del sistema e conducendo esperimenti con questo modello per meglio comprenderne il funzionamento considerando diverse alternative nella sua gestione.

Il DSS WARGI (Water Resources System Optimization Aided by Graphical Interface) è stato sviluppato dal CRIFOR-CINSA (Centro di Ricerca e Formazione delle Reti del Centro Interdipartimentale CINSA) dell'Università degli Studi di Cagliari e consta fondamentalmente di tre moduli: uno per la simulazione (WARGI-SIM), uno per l'ottimizzazione (WARGI-OPT) e uno per l'analisi di qualità della risorsa (WARGI-QUAL). Il DSS WARGI è principalmente indirizzato per l'applicazione a sistemi di approvvigionamento da risorse idriche superficiali di tipo multi-serbatoio e multi-utenza. Nella predisposizione di WARGI-SIM, l'obiettivo è stato quello di realizzare un software di simulazione che fosse, per quanto possibile, generale e non legato a specifiche configurazioni. La gestione del sistema è realizzata attraverso l'implementazione di una serie di istruzioni sequenziali i cui obiettivi sono formulati utilizzando la combinazione di procedure in parte gestite direttamente dall'utente, in parte definite automaticamente con l'interazione tra simulatore ed ottimizzatore.

⁴ Andreu, J., Capilla, J., Sanchis, E. (1996). AQUATOOL, a generalised decision-support system for water-resources planning and operational management, *Journal of Hydrology*, 1996, 177(3-4), 269-291

⁵ Sechi G.M., P. Zuddas. (2000). WARGI:Water Resources System Optimization Aided by Graphical In-terface. In W. R. Blain and C. A. Brebbia, editors, pages 109–120. WIT-PRESS.

⁶ Labadie, J.W., Baldo, M.L., Larson, R. (2000). MODSIM: Decision Support System for River Basin Management: Documentation and User Manual, Colorado State University and U.S. Bureau of Reclamation, Ft Collins, CO.

⁷ Young W.J., Lam D.C.L., Ressel V., Wong I.W. (2000). Development of an enviromental flows decision support system. *J. Enviromental Modelling & Software*, 15, 257-265

⁸ US Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (2003). HEC-ResSim Reservoir System Simulation. User's Manual

⁹ Zagona E., Fulp T., Shane R., Magee T., Goranflo H. (2001). RiverWare: A generalized tool for complex reservoir systems modeling. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(4):913-929.

¹⁰ Jamieson D.G., Fedra K. (1996) The 'WaterWare' decision-support system for river-basin planning. 1. Conceptual design. *Journal of Hydrology* 177(3):163-175

¹¹ SEI Stockholm Environment Institute, (2005). WEAP: Water Evaluation and Planning System, User Guide. Somerville, MA



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

Sulla base dei risultati di precedenti ricerche e progetti, in particolare una ricerca finanziata dalla Regione Sardegna con fondi Legge n. 7¹², ove si è posta particolare attenzione all'analisi dei sistemi idrici di approvvigionamento da serbatoi superficiali utilizzati a scopo multiplo, si ritiene che WARGI-SIM sia sicuramente uno strumento operativo idoneo per sviluppare le simulazioni del sistema di approvvigionamento idrico oggetto del presente studio.

Il modello di simulazione WARGI-SIM definisce la configurazione dei flussi nel sistema utilizzando *criteri di preferenza sulle risorse*, da utilizzare come fonte nell'attivare i flussi di erogazione, e *criteri di priorità sulle utenze*, da soddisfare con i flussi di erogazione. I *criteri di preferenza* e i *criteri di priorità* sono semplicemente formulabili e modificabili dall'utente tramite l'interfaccia grafica del quale il software è dotato.

La formulazione dell'algoritmo di simulazione è agevolata dalla definizione del grafo base del sistema idrico. Il supporto del grafo base e la conseguente definizione del grafo multi-periodo, esteso all'intero orizzonte temporale considerato, permette di rappresentare in modo intuitivo tutte le complesse interazioni tra gli elementi del sistema in un generico periodo di simulazione e le possibilità di trasferimento inter-temporale della risorsa.

Un generico nodo del grafo base può rappresentare una fonte di risorsa (serbatoio, traversa, acquifero, ecc.), un centro di domanda (utenza irrigua, potabile, ecc.) o un semplice nodo di trasferimento. Ad ogni nodo domanda è associato sia un livello di priorità, eventualmente articolato in fasce, sia una lista di preferenze delle risorse che il gestore può individuare nell'approvvigionamento dai nodi interconnessi. Ad ogni nodo risorsa possono essere associati vincoli di limitazione della erogazione verso le domande, in modo da salvaguardare quelle a maggiore priorità. Ai trasferimenti sono associati vincoli capacitativi derivanti dalle caratteristiche infrastrutturali del sistema. Nei nodi invaso è possibile definire il livello massimo e minimo della risorsa erogabile verso le utenze. È inoltre possibile valutare un *volume riservato* come percentuale del volume di invaso disponibile. A questo *volume riservato* possono accedere solo le domande individuate dall'utente, per preservare le stesse utenze da eventuali deficit.

4.2 IL SISTEMA IDRICO DEL CEDRINO

4.2.1 QUADRO DELLA DOMANDA

Il sistema idrico del Cedrino, schematizzato in Figura 4.1, è costituito dall'omonimo invaso che alimenta differenti centri di domanda raggruppabili nelle tre macro-utenze principali definite sulla base della tipologia, ovvero:

- civile;
- industriale;
- irrigua.

¹² Zucca R, Andreu J., Arena C., Lerma N., Mazzola M.R., Sechi G.M., (2014) Analisi di strumenti di supporto alle decisioni per sistemi idrici multi-settoriali in condizioni di carenza di risorsa: il sistema idrico del Sud Sardegna

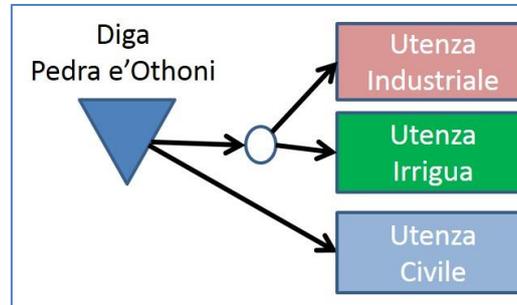


Figura 4.1 – Schematizzazione del sistema idrico del Cedrino

In Tabella 4.1 si riporta l'idroesigenza annuale delle tre macro-utenze.

Tabella 4.1 – Richiesta utenze

Utenza	Richiesta
	[Mm ³ /anno]
Civile	3.50
Industriale	0.05
Irrigua	23.00
TOT	26.55

La ripartizione mensile della richiesta annuale delle utenze è stata considerata costante per quella civile e industriale, mentre per l'irrigua si utilizza un tipico andamento con forma a campana con il picco di richiesta nei mesi più asciutti (Figura 4.2), adottando la stessa ripartizione utilizzata in Zucca et al. (2014)¹³ per il sistema idrico del Sud Sardegna. Sulla base di tale ripartizione si riportano in Tabella 4.2 le erogazioni mensili utilizzate nella modellazione del sistema idrico.

¹³ Zucca R, Andreu J., Arena C., Lerma N., Mazzola M.R., Sechi G.M. (2014) Analisi di strumenti di supporto alle decisioni per sistemi idrici multi-settoriali in condizioni di carenza di risorsa: il sistema idrico del Sud Sardegna

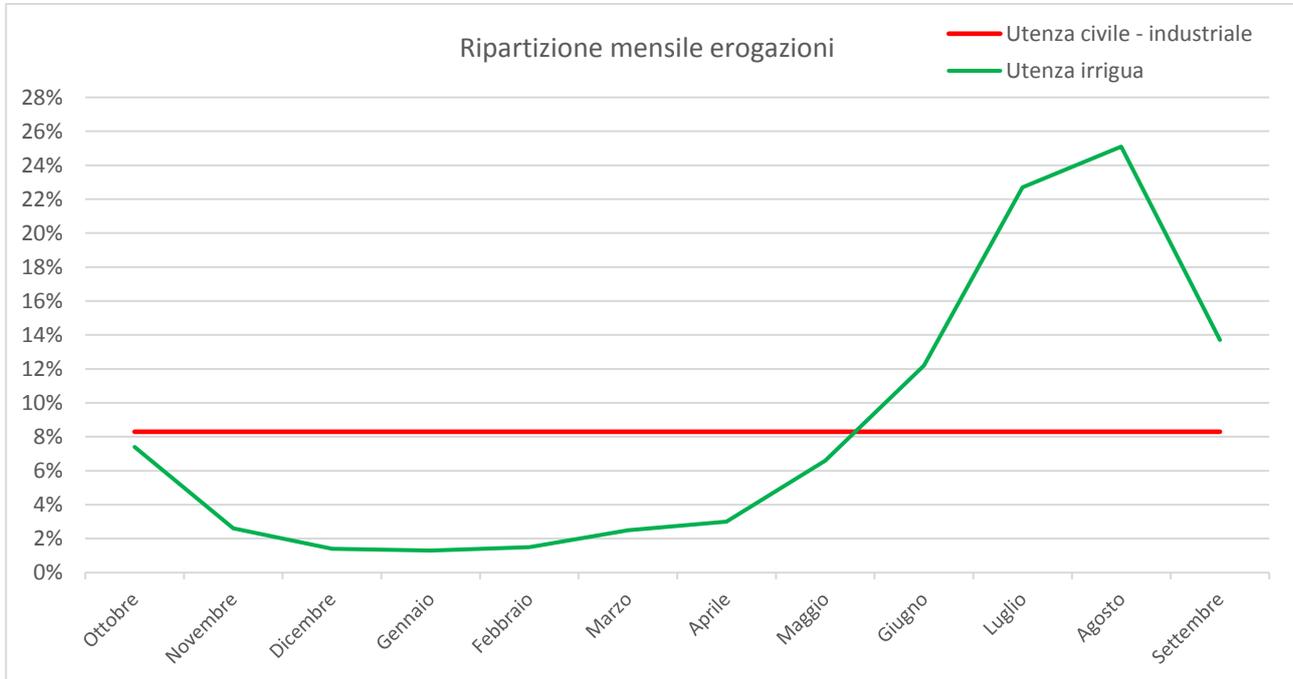


Figura 4.2 - Ripartizione mensile percentuale

Tabella 4.2 - Erogazioni mensili

Erogazione [Mm ³]	Ott.	Nov.	Dic.	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Set.
Civile	0.2905	0.2905	0.2905	0.2905	0.2905	0.2905	0.2905	0.2905	0.2905	0.2905	0.2905	0.2905
Industrial	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042
Irrigua	1.702	0.598	0.322	0.299	0.345	0.575	0.69	1.518	2.806	5.221	5.773	3.151
TOT	2.00	0.89	0.62	0.59	0.64	0.87	0.98	1.81	3.10	5.52	6.07	3.45

4.2.2 INPUT IDROLOGICI

Gli input idrologici utilizzati nella modellazione del sistema idrico sono stati estratti, una prima fase di indagini dal documento regionale Piano Stralcio di Utilizzo delle Risorse Idriche (PSURI)¹⁴ e, in una seconda fase di analisi, dallo studio SSS-2¹⁵.

Come ben noto, nel PSURI sono state definite le serie sintetiche di riferimento dei deflussi da associare alle principali sezioni di interesse dei corsi d'acqua della Sardegna. Sulla base della riduzione dei deflussi osservati nel 15-ennio idrologico critico 1987-2003, le serie PSURI ricalibrano le serie storiche per il periodo 1922-1975 considerando una modifica dei parametri statistici utilizzati nella generazione delle serie idrologiche annuali (riduzione al 55% della media e del 20% della varianza) Le serie sintetiche così definite considerano un orizzonte temporale pari a 53 anni idrologici con passo mensile.

¹⁴ Piano stralcio di bacino della regione Sardegna per l'utilizzo delle risorse idriche. Regione Autonoma della Sardegna

¹⁵ Nuovo Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna. Regione Autonoma della Sardegna. Assessorato della Programmazione, Bilancio ed Assetto del Territorio - Centro Regionale di Programmazione. Ente Autonomo del Flumendosa



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

La sezione di imposta dello sbarramento della diga di Pedra e'Othoni sul Cedrino corrisponde ad una sezione di interesse analizzata nel PSURI e pertanto è facilmente determinabile l'input idrologico associato. In accordo con l'estensione delle serie idrologiche PSURI, l'orizzonte temporale utilizzato nel presente studio è stato di 53 anni idrologici con passo mensile. Questa disponibilità di dati idrologici è sostanzialmente coerente con l'obiettivo principale dell'analisi: ossia quello della caratterizzazione della risorsa ai fini della verifica per via simulativa delle conseguenze nella modifica alla capacità utile di regolazione dell'invaso. Le serie di deflusso disponibili si possono, infatti, considerare estese per un orizzonte temporale sufficiente per rappresentare i processi di regolazione dei grandi serbatoi artificiali.

Peraltro, il serbatoio considerato non evidenzia coefficienti di utilizzazione che determinino trasferimenti significativi tra diversi anni. Non è questo il caso, inoltre, per cui l'ampiezza complessiva del periodo critico di regolazione si amplifica all'aumento del livello di inter-connesione fra sistemi idrici. Seppure le procedure di costruzione delle serie idrologiche ri-scalate in PSURI siano state oggetto di alcune critiche, in relazione alla importante riduzione della entità dei deflussi che esse introducono, si è ritenuto che nell'ambito di una analisi cautelativa delle potenzialità di soddisfacimento della domanda fosse preliminarmente necessaria la simulazione utilizzando queste serie idrologiche.

Nei grafici che seguono si riportano la serie di deflussi associata come input all'invaso del Cedrino, riportando anche il valore del deflusso medio annuo.

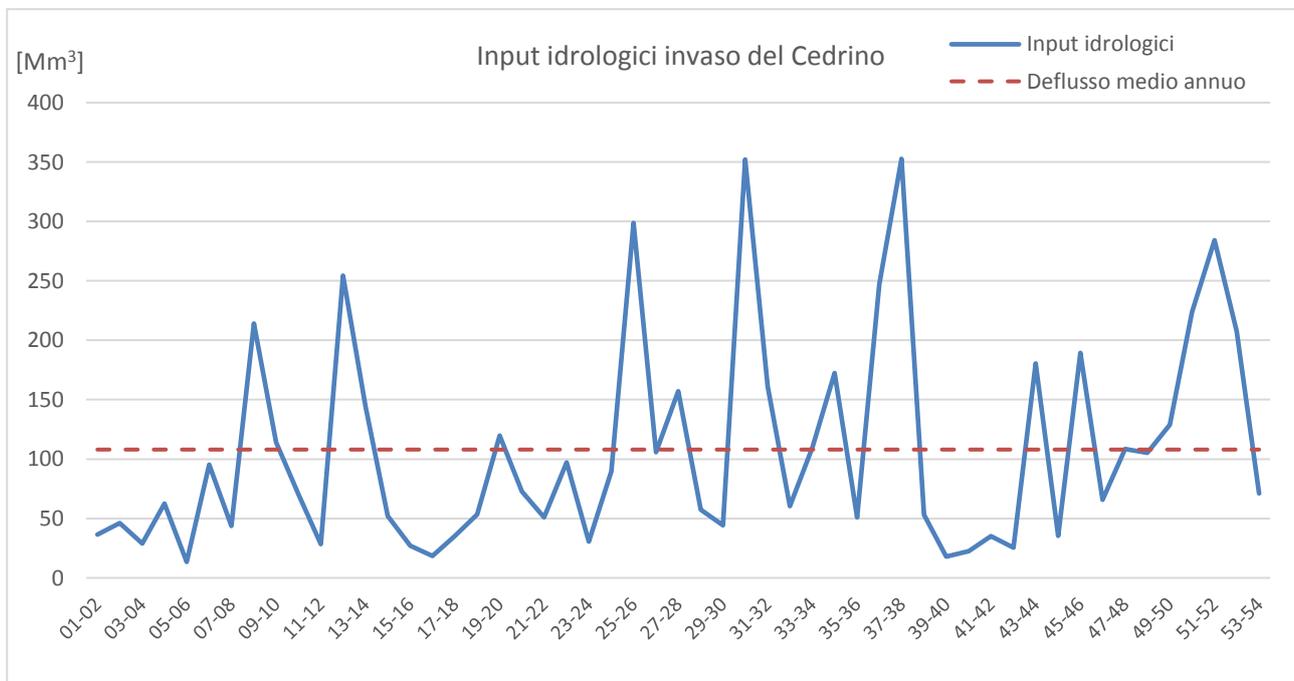


Figura 4.3 - Input idrologici all'invaso del Cedrino – Serie PSURI

4.2.3 EVAPORAZIONE DAGLI INVASI

Per quanto riguarda i dati di evaporazione, il PSURI definisce tre gruppi di invasi cui sono associate differenti altezze unitarie di evaporazione mensile da specchio liquido (Tabella 4.3).



Ogni invaso del territorio regionale è stato quindi inserito in uno dei tre gruppi a seconda dei dati climatici e geografici caratterizzanti la zona dell'opera di sbarramento. Nel DSS WARGI, per ogni invaso sono, inoltre, definiti i valori dei coefficienti "a" e "b" della funzione esponenziale $S = a \cdot V^b$ che mette in relazione i volumi invasati con la superficie di invaso. Tali informazioni sono inserite nel modello di simulazione per calcolare adeguatamente il volume di evaporazione dall'invaso in esame.

Tabella 4.3 - Altezza unitaria mensile di evaporazione per gruppo di invaso

Mese	A [mm]	B [mm]	C [mm]
Gennaio	49.5	66.0	56.1
Febbraio	57.0	76.0	64.6
Marzo	85.5	114.0	96.9
Aprile	99.0	132.0	112.2
Maggio	154.5	206.0	175.1
Giugno	184.5	246.0	209.1
Luglio	247.5	330.0	280.5
Agosto	228.0	304.0	258.4
Settembre	156.0	208.0	176.8
Ottobre	103.5	138.0	117.3
Novembre	82.5	110.0	93.5
Dicembre	57.0	76.0	64.6
TOTALE	1504	2006	1705

In Tabella 4.4 sono riportati il gruppo di appartenenza, l'altezza di evaporazione unitaria e i coefficienti "a" e "b" associati all'invaso artificiale determinato dalla diga Pedra e'Othoni.

Tabella 4.4 - Dati caratteristici di evaporazione per l'invaso del Cedrino

Invaso	Cedrino
Gruppo	C
Coefficiente "a"	0.192
Coefficiente "b"	0.778

4.3 SCENARI DI SIMULAZIONE

Come già detto, WARGI-SIM assegna ad ogni utenza del sistema una scala di priorità ed un elenco di preferenze nell'uso delle differenti risorse, quando disponibili.

Nelle simulazioni del sistema è stata assegnata la priorità massima (priorità 1) all'utenza civile, successivamente si considera l'utenza industriale (priorità 2) e si assegna la priorità inferiore all'utenza irrigua (priorità 3). Per quanto concerne le preferenze di risorsa, considerata la presenza del solo invaso del Cedrino



nel sistema idrico analizzato, questo rappresenta l'unica risorsa presente nell'elenco delle fonti di approvvigionamento di ciascuna utenza.

L'obiettivo della modellazione è quello di valutare l'influenza che le limitazioni di invaso sopra descritte (Tabella 3.1) determinano nella gestione del sistema idrico. Sono stati, pertanto, considerati due scenari di simulazione:

- scenario A: simulazione del sistema con le attuali regole gestionali;
- scenario B: simulazione del sistema con modifica delle attuali regole gestionali, inserendo limiti di invaso ipotizzati nell'ambito dei lavori del Tavolo Tecnico.

A seguito di alcune simulazioni di calibrazione del modello è emersa la necessità di considerare un volume riservato a favore delle due utenze prioritarie, civile e industriale, che ne preservi il totale soddisfacimento senza la presenza di deficit. Per lo scenario A l'entità di tale volume è risultato pari a 0.7 Mm³ e, per omogeneità di analisi, tale entità è stata confermata anche nello scenario B.

4.3.1 RISULTATI OTTENUTI

I risultati ottenuti sono riassumibili nelle seguenti tabelle relative alla quantificazione dei deficit alle utenze (Tabella 4.5 e Tabella 4.6) e ai dati di invaso (Tabella 4.7) riferiti ai 53 anni di analisi nei due scenari analizzati.

Tabella 4.5 – Deficit alle utenze – Scenario A

Utenza	Deficit medio in 53 anni	MAX Deficit	Numero di anni con deficit		Deficit medio negli anni con deficit
	[%]		[-]	[%]	[%]
Civile	-	-	-	-	-
Industriale	-	-	-	-	-
Irriguo	11.1%	60.7	38	72%	15.5%

Tabella 4.6 – Deficit alle utenze – Scenario B

Utenza	Deficit medio in 53 anni	MAX Deficit	Numero di anni con deficit		Deficit medio negli anni con deficit
	[%]		[-]	[%]	[%]
Civile	-	-	-	-	-
Industriale	-	-	-	-	-
Irriguo	12.0%	60.7%	38	72%	16.7%



Tabella 4.7 – Dati di invaso – Scenario A e B

Scenario	Volume medio	Evaporazione	Sfioro medio in 53 anni	Numero di anni con sfioro	Sfioro medio negli con sfioro
	[Mm ³ /mese]	[Mm ³ /anno]	[Mm ³ /anno]	[-]	[Mm ³ /anno]
A	13.2	2.3	81.8	49	88.5
B	12.4	2.3	82.1	50	87.0

Per quanto riguarda le utenze prioritarie, civile e industriale, il volume riservato adottato nello scenario A è in grado di assicurare il totale soddisfacimento delle utenze anche nello scenario B. Al contrario, la riduzione della quota autorizzata nei mesi da ottobre a gennaio nel secondo scenario B determina un lieve incremento percentuale annuo dei deficit all'utenza irrigua, che si manifesta per lo stesso numero di anni.

Per quanto riguarda i dati di invaso, come prevedibile, nel secondo scenario si riscontra un volume medio inferiore e un incremento del volume sfiorato e dei relativi anni con presenza di sfioro.

Si riportano di seguito i grafici rappresentativi dei risultati ottenuti.

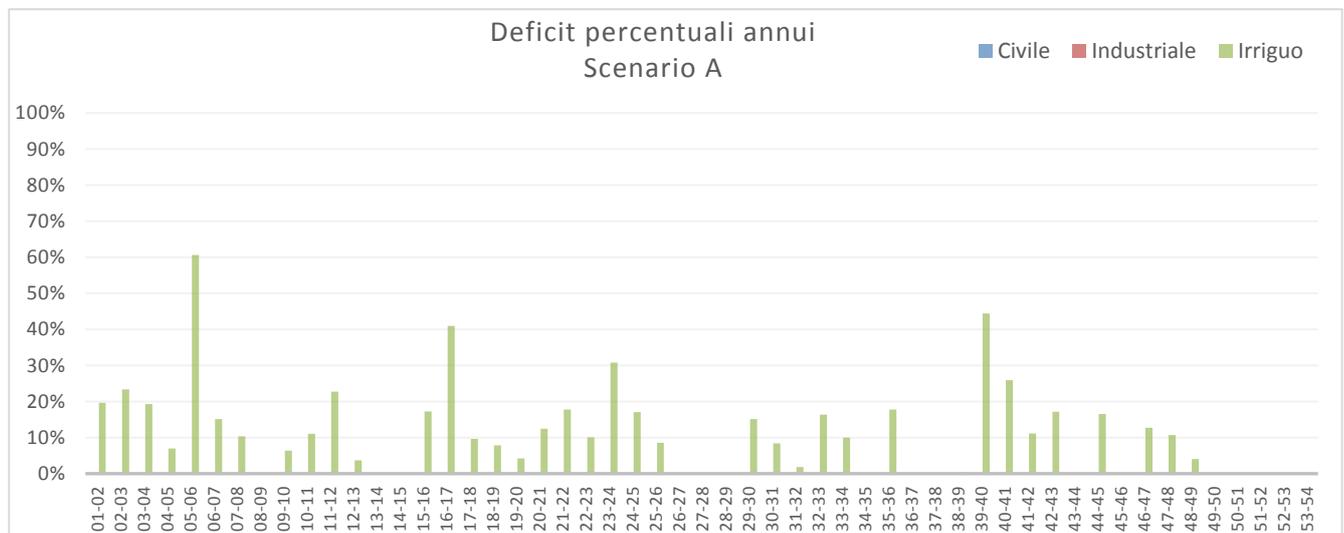


Figura 4.4 – Deficit percentuali annui – Scenario A



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

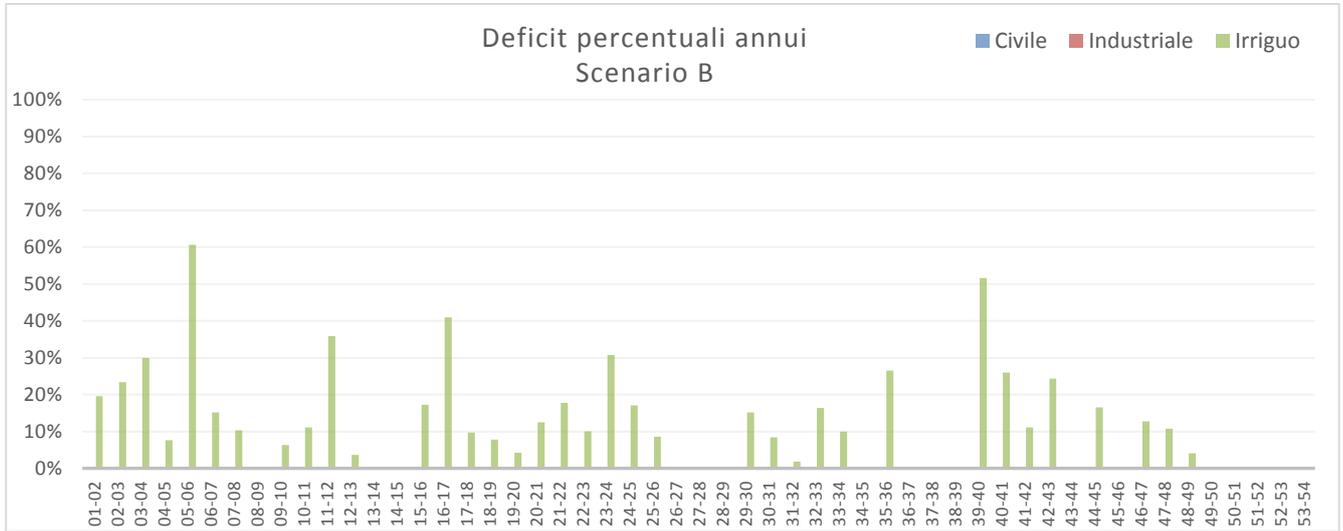


Figura 4.5 – Deficit percentuali annui – Scenario B

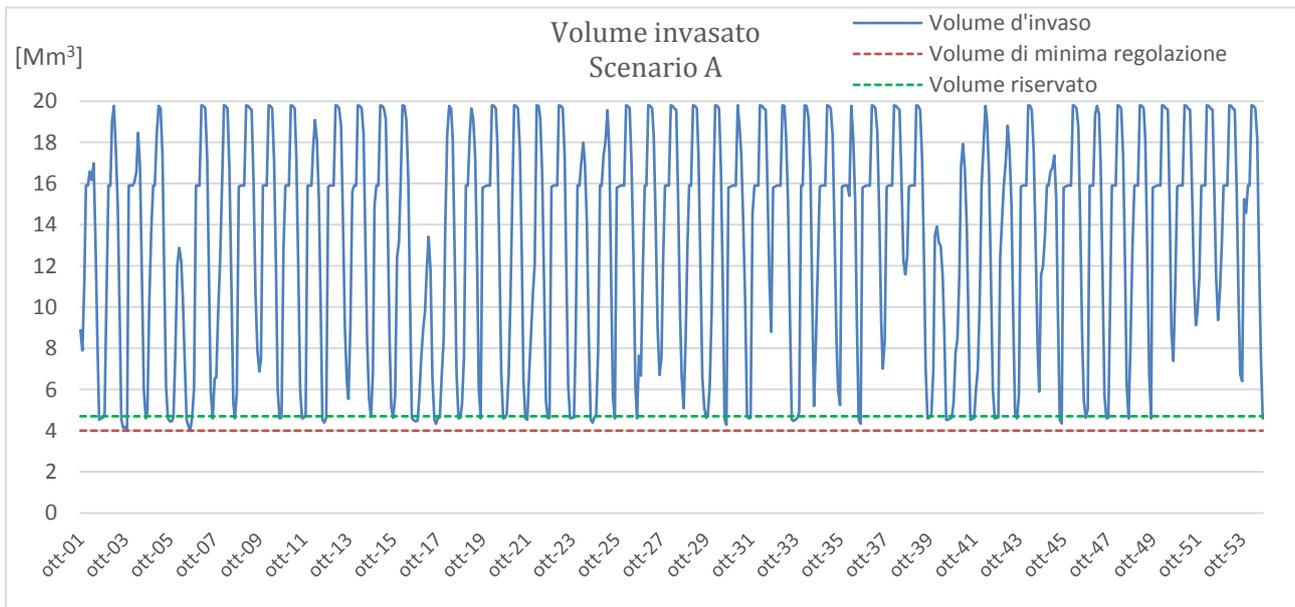


Figura 4.6 – Volumi di invaso – Scenario A

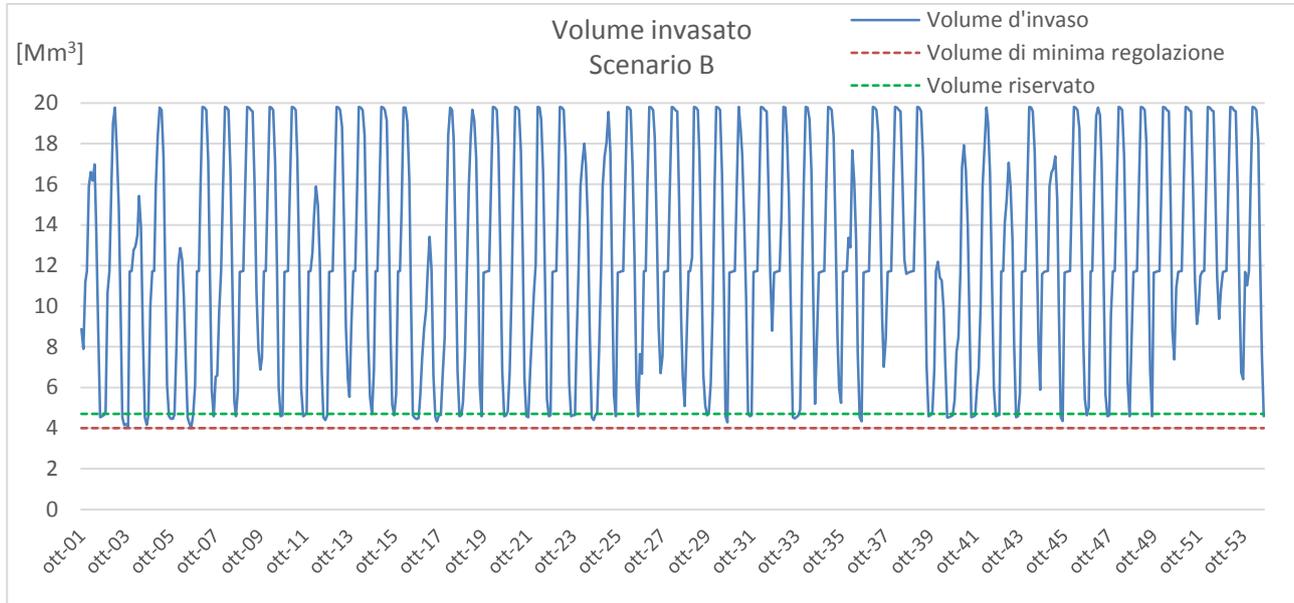


Figura 4.7 - Volumi di invaso – Scenario B

4.3.2 MODIFICA DEGLI INPUT IDROLOGICI – SERIE SISS-2

In una seconda fase di indagini sono state effettuate ulteriori simulazioni considerando come input idrologici quelli storici ricostruiti dal 1922 al 1992, per un totale di 70 anni idrologici, nello studio SISS-2¹⁶.

Come già detto, rispetto ai deflussi valutati dal PSURI, quelli storici ricostruiti sono caratterizzati da un valor medio superiore, come si evince dalla seguente tabella.

Tabella 4.8 – Deflussi PSURI e storici SISS

Mese	Deflussi PSURI [Mm ³ /mese]	Deflussi SISS [Mm ³ /mese]
Ottobre	9	15.6
Novembre	9.6	16.2
Dicembre	19.2	38.7
Gennaio	16	35.2
Febbraio	18.9	38.4
Marzo	16.9	35.5
Aprile	8.2	19.4
Maggio	5.7	12
Giugno	2	5.2
Luglio	0.9	2.2
Agosto	0.7	1.8
Settembre	0.8	2.2
TOT	108	222

¹⁶ Nuovo Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna. Regione Autonoma della Sardegna. Assessorato della Programmazione, Bilancio ed Assetto del Territorio - Centro Regionale di Programmazione. Ente Autonomo del Flumendosa



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

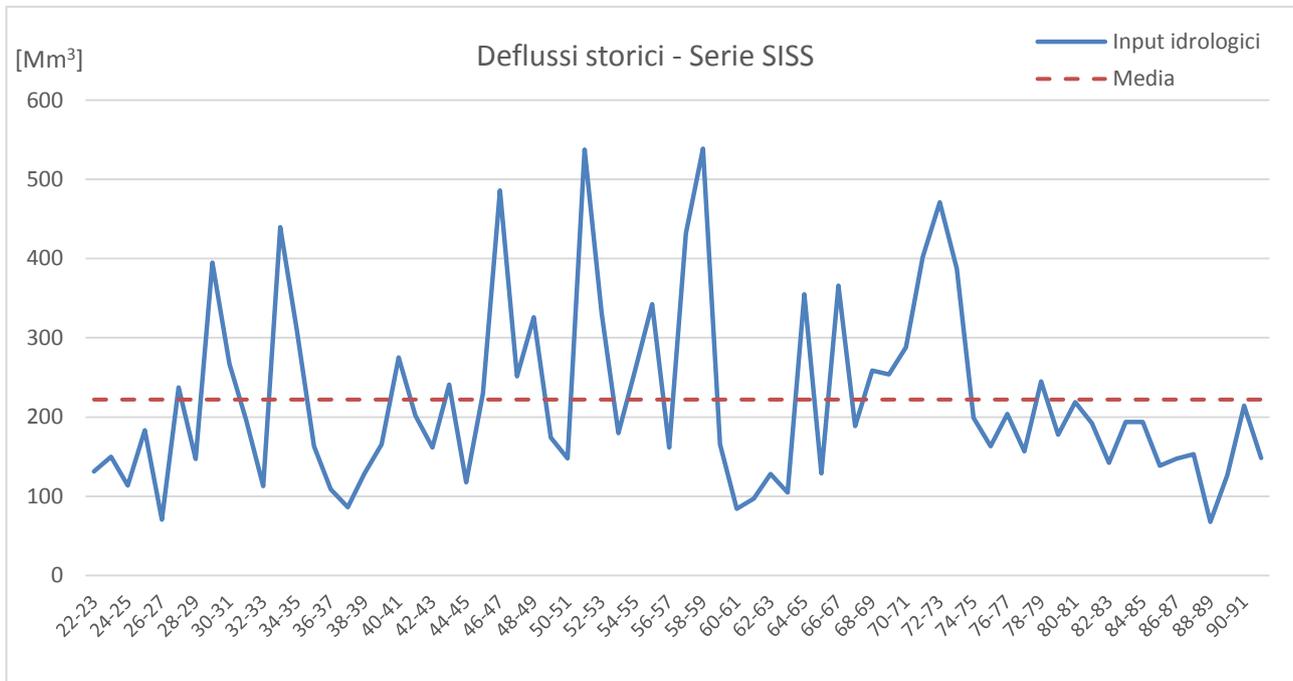


Figura 4.8 – Deflussi storici – Serie SISS

I risultati ottenuti nei due scenari precedentemente definiti e considerando i deflussi storici ricostruiti in SISS-2 sono riassunti nelle seguenti tabelle.

Tabella 4.9 – Deficit alle utenze – Scenario A, serie SISS-2

Utenza	Deficit medio in 70 anni	MAX Deficit	Numero di anni con deficit		Deficit medio negli anni con deficit
	[%]		[%]	[-]	
Civile	-	-	-	-	-
Industriale	-	-	-	-	-
Irriguo	1.0%	28.8%	11	16%	6.2%

Tabella 4.10 – Deficit alle utenze – Scenario B, serie SISS-2

Utenza	Deficit medio in 70 anni	MAX Deficit	Numero di anni con deficit		Deficit medio negli anni con deficit
	[%]		[%]	[-]	
Civile	-	-	-	-	-
Industriale	-	-	-	-	-
Irriguo	1.0%	28.8%	11	16%	6.2%



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

Tabella 4.11 – Dati di invaso – Scenario A e B, serie SISS-2

Scenario	Volume medio	Evaporazione	Sfioro medio in 70 anni	Numero di anni con sfioro	Sfioro medio negli con sfioro
	[Mm ³ /mese]	[Mm ³ /anno]	[Mm ³ /anno]	[-]	[Mm ³ /anno]
A	15.4	2.7	193.3	70	193.3
B	14.3	2.6	193.4	70	193.4

Rispetto alle configurazioni precedenti, caratterizzate dall'utilizzo delle serie idrologiche PSURI, si conferma l'assenza di deficit all'utente civile e industriale e la riduzione dei deficit per l'utenza irrigua, che si attesta su valori medi di circa il 6% in entrambi gli scenari analizzati. Utilizzando le serie storiche SISS emerge la sostanziale equivalenza dei due scenari gestionali e si ricorda che in queste simulazione l'orizzonte temporale di analisi è esteso a 70 anni idrologici. Per coerenza, si è voluto mantenere anche in queste simulazioni il volume riservato per le utenze prioritarie di 0.7 milioni di metri cubi (4.7 totali), anche se dai risultati sarebbe stato possibile ipotizzare una sua riduzione.

A documentazione dell'analisi si riportano i grafici relativi ai deficit percentuali annui e all'andamento dei volumi d'invaso.

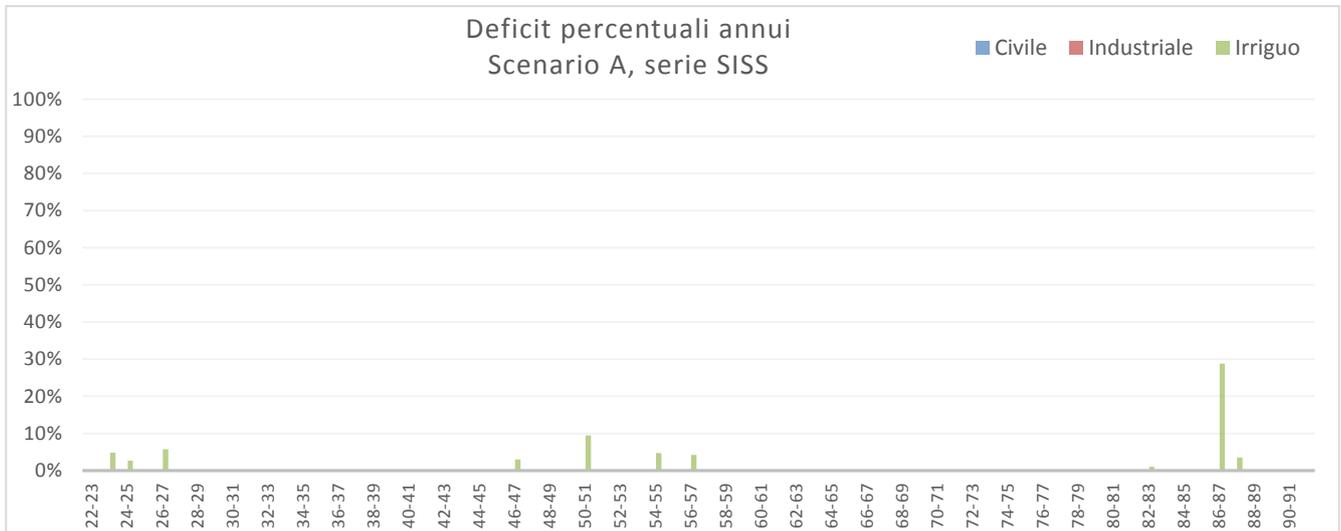


Figura 4.9 – Deficit percentuali annui – Scenario A, serie SISS



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

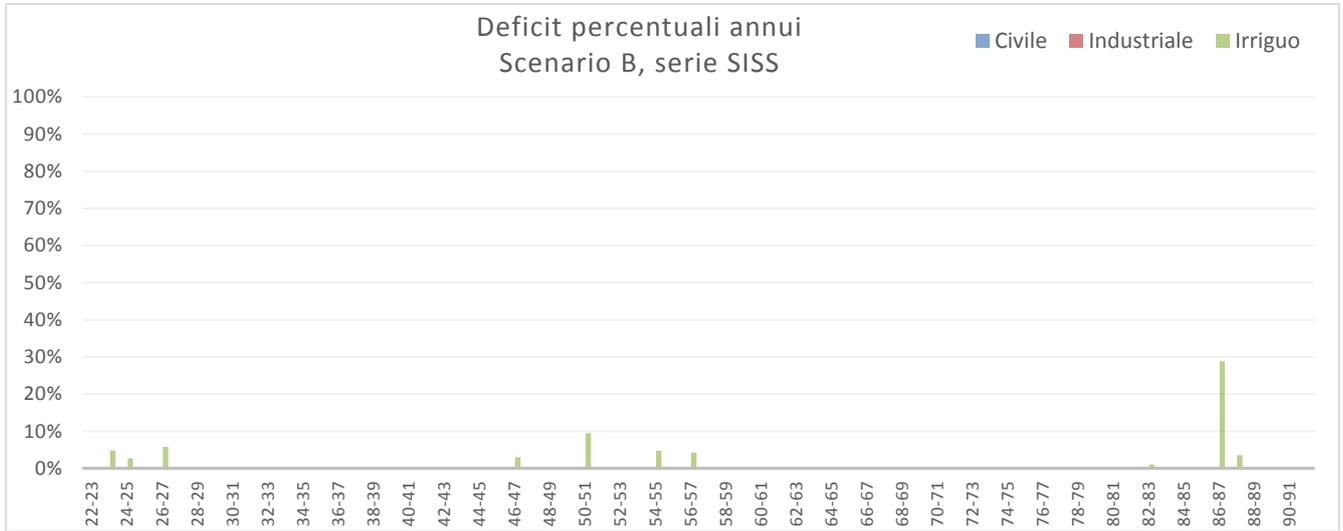


Figura 4.10 – Deficit percentuali annui – Scenario B, serie SISS

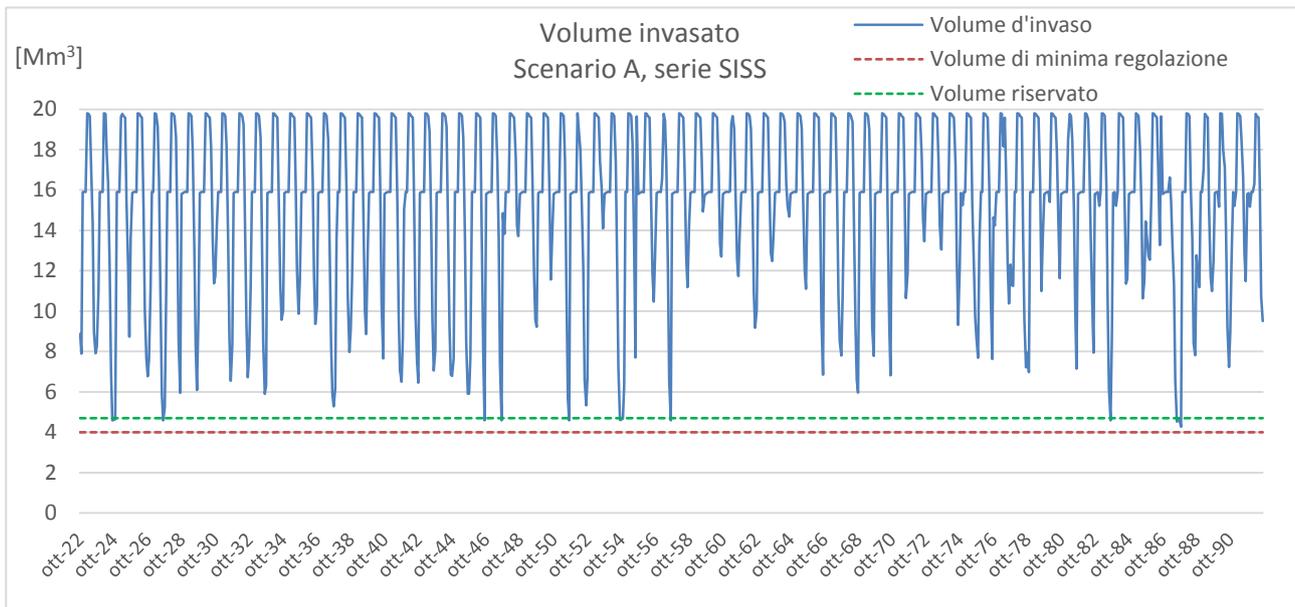


Figura 4.11 – Volumi di invaso – Scenario A, serie SISS



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

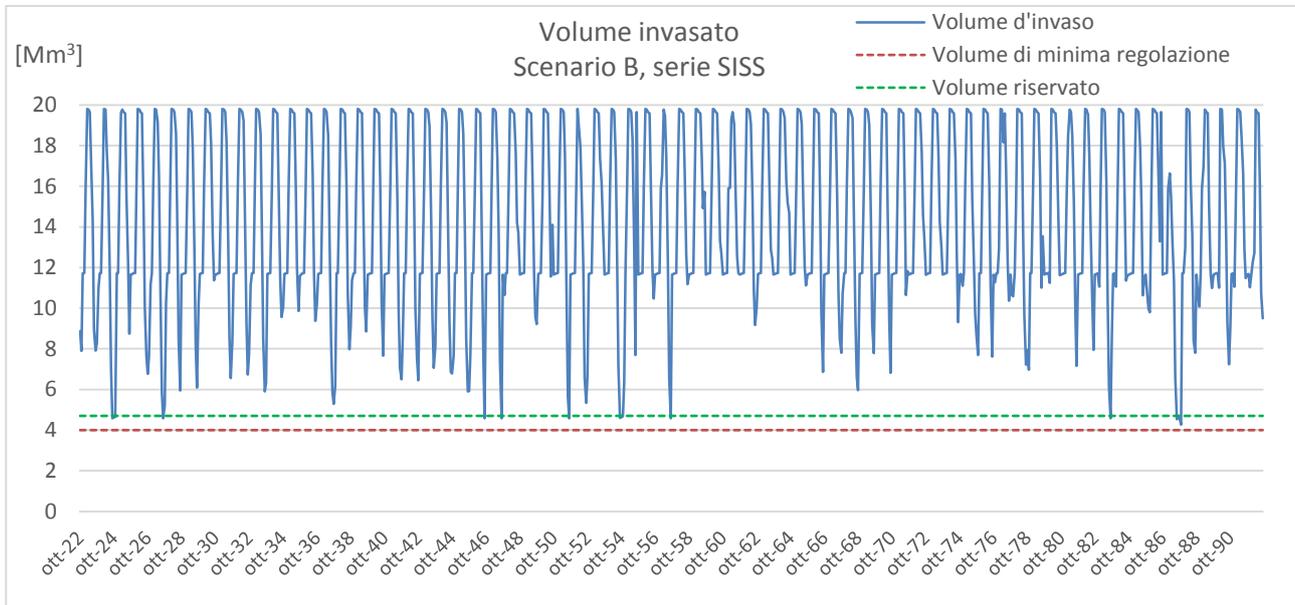


Figura 4.12 - Volumi di invaso – Scenario B, serie SISS



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

5 Laminazione dell'onda di piena nell'invaso del Cedrino

5.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Nel presente capitolo si illustrano i risultati della simulazione del processo di laminazione dell'onda di piena nell'invaso del Cedrino.

Nella definizione dell'idrogramma di piena in ingresso all'invaso, coerentemente con le indicazioni metodologiche date in premessa e con gli indirizzi che si è dato il Tavolo Tecnico di pervenire in tempi rapidi a *"Piani di laminazione statica anche di carattere speditivo"*, si conferma l'impostazione metodologica utilizzata nel Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF)¹⁷ e ripresa dal DICAAR nell'ambito del PGRA. Pertanto, l'evento di piena è caratterizzato da un idrogramma di forma triangolare nel quale la portata al colmo, l'entità della fase di concentrazione e il volume di piena sono definiti coerentemente con le indicazioni di PSFF. Le metodologie di calcolo per la determinazione della portata al colmo è pertanto di tipo diretto ed è basato sulla distribuzione probabilistica TCEV regionalizzata¹⁸. Si ricorre all'informazione pluviometrica per determinare il volume complessivo di piena tramite la stima del volume di pioggia netta. Per ulteriori dettagli sulle valutazioni degli elementi di calcolo adottate si rimanda agli allegati alla presente relazione.

Si ricorda che il PSFF fornisce le portate per cinque tempi di ritorno: 2, 50, 100, 200 e 500 anni. Nell'ambito delle valutazioni specifiche per l'invaso in esame, e considerando le finalità del presente studio, si è deciso di trascurare l'effetto di laminazione dell'invaso per i tempi di ritorno di 2 anni e di 500 anni. Si ricorda che il valore di portata in corrispondenza del tempo di ritorno minore è considerato nell'ambito dei Piani di Laminazione per la definizione della entità di "piena ordinaria" nella valutazione del tempo di intervento.

In Figura 5.1 si riportano gli idrogrammi utilizzati e in Tabella 5.1 si forniscono i valori dei relativi parametri.

¹⁷ Relazione Monografica di Bacino Idrografico – Fiume Cedrino. Studi, indagini, elaborazioni attinenti all'ingegneria integrata, necessari alla redazione dello studio denominato Progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF). Assessorato dei Lavori Pubblici. Regione Autonoma della Sardegna

¹⁸ Cao C., Sechi G.M., Becciu G. (1988). Analisi regionale per la valutazione probabilistica delle piene in Sardegna. XXI Convegno di Idraulica e costruzioni idrauliche. L'Aquila.

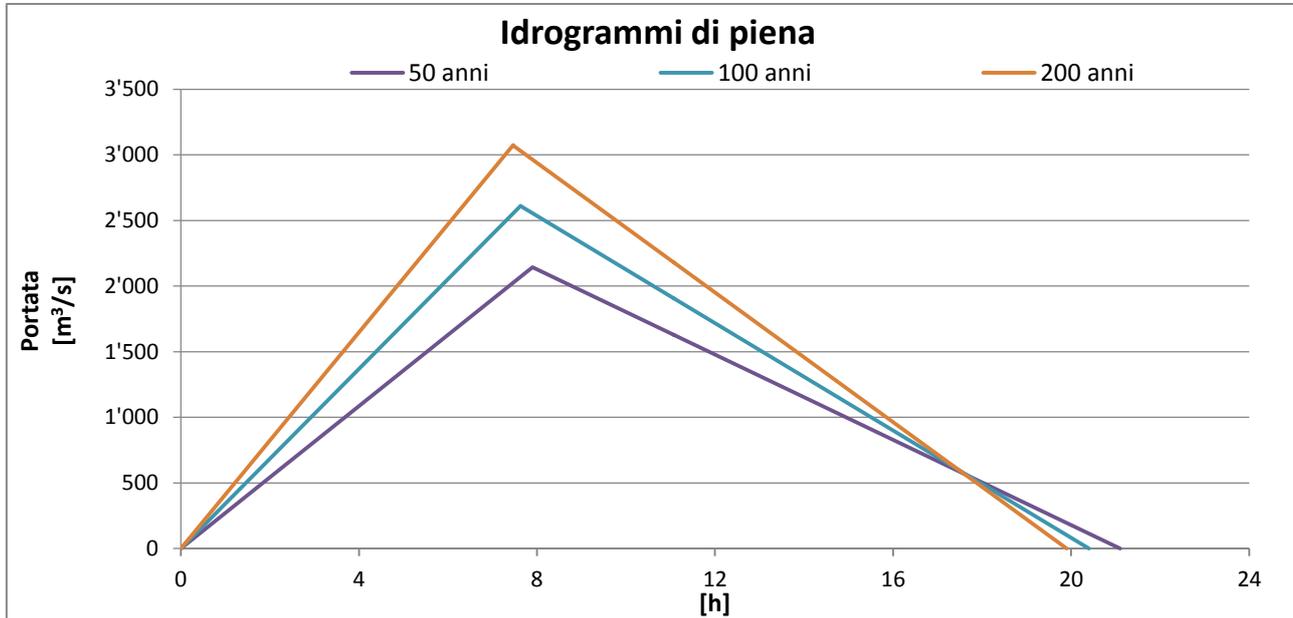


Figura 5.1 – Idrogrammi di piena in ingresso all'invaso

Tabella 5.1 – Parametri dell'onda di piena in ingresso all'invaso

Tempo di ritorno	[anni]	50	100	200
Portata al colmo	[m³/s]	2'144	2'611	3'073
Tempo di picco	[h]	7.9	7.6	7.5
Tempo di base	[h]	21.1	20.4	19.9
Volume	[Mm³]	81.4	95.9	110.1

Si precisa che negli anni ai quali risale la redazione del PSFF lo scarico di superficie inferiore si trovava ancora nelle condizioni originali e pertanto il processo di laminazione in PSFF ha determinato differenti valori delle portate effluenti. Il livello iniziale di invaso utilizzato nella procedura di PSFF è stato posto unicamente pari alla quota di massima regolazione, ovvero 103.00 m s.l.m., ed è stato ipotizzato chiuso lo scarico di fondo. I risultati ottenuti dal PSFF sono dati in Tabella 5.2, in cui si riportano i valori del colmo di portata laminata dall'invaso per i differenti tempi di ritorno. La procedura di laminazione che sarà di seguito illustrata terrà, invece, ovviamente conto dello stato di fatto attuale negli organi di scarico dall'invaso e delle ipotesi sui livelli limite di invaso precedentemente definiti.

Tabella 5.2 – Risultati della procedura di laminazione del PSFF

Tempi di ritorno	[anni]	2	50	100	200	500
Portata al colmo in ingresso all'invaso	[m³/s]	289	2'144	2'611	3'073	3'680
Portata di picco laminata	[m³/s]	162	1'070	1'410	1'760	1'980



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

5.2 RISULTATI DELLA PROCEDURA DI LAMINAZIONE DELL'INVASO DEL CEDRINO

La simulazione del processo di laminazione è stata realizzata utilizzando l'equazione di continuità dei laghi, inserendo come input l'idrogramma dell'onda di piena triangolare (Figura 5.1), considerando la curva d'invaso del lago (Figura 2.3) e le portate effluenti dagli organi di scarico della diga alle diverse quote d'invaso (Tabella 2.2). Per le quote d'invaso non riportate in tabella si considera un valore di portata effluente calcolato da interpolazione lineare. Il passo temporale di analisi è pari a 1 minuto e la discretizzazione dei livelli di invaso assunta in 1 cm. Per una descrizione della procedura implementata per la simulazione della laminazione si rimanda agli allegati alla presente relazione.

Come già detto, la laminazione è stata effettuata considerando tre differenti configurazioni di livello iniziale d'invaso coincidenti con le limitazioni di quota riportate in Tabella 3.1, ovvero:

- 96 m s.l.m.;
- 100 m s.l.m.;
- 103 m s.l.m.

I criteri seguiti nell'attivazione dello scarico a valle delle acque sono coerenti con quanto riportato al punto 2.1.o) della Direttiva P.C.M. 8 Luglio 2014 che prescrive di *“determinare un incremento graduale delle portate scaricate, contenendone al massimo l'entità, che, a partire dalla fase di preallerta per «rischio diga» e in condizione di piena, non deve superare, nella fase crescente, quella della portata affluente al serbatoio; nella fase decrescente la portata scaricata non deve superare quella massima scaricata nella fase crescente.”*

Pertanto, le regole di gestione degli scarichi utilizzate nell'ambito della laminazione sono le seguenti:

- utilizzo in progressione e quando possibile dello scarico di superficie inferiore dotato di paratoia;
- utilizzo degli ulteriori scarichi di superficie non governabili manualmente;
- considerato il delicato e rischioso funzionamento dello scarico di fondo, questo viene ipotizzato chiuso durante la procedura di laminazione;
- nella fase di crescita la portata laminata è al più uguale a quella in ingresso;
- nella fase di decrescita la portata laminata è almeno uguale a quella in ingresso;
- nella fase di decrescita la paratoia dello scarico di superficie inferiore viene rialzata al raggiungimento del livello d'invaso di partenza.

Poiché al superamento della quota di 103 m s.l.m. la paratoia viene automaticamente abbattuta, a seguito di lettura del livello d'invaso da parte di un sensore, nelle simulazioni realizzate si ipotizza il funzionamento della stessa tale da consentire di scaricare nella fase iniziale dell'evento una portata non superiore a quella in ingresso, come richiesto dalla Direttiva.



I risultati della procedura di laminazione sono riassunti nelle tabelle e nei grafici seguenti. Si rimanda agli allegati alla presente relazione per le tabelle con i valori discreti di portata laminata e di livello d'invaso con passo temporale di 15'.

Tabella 5.3 – Risultati della laminazione

Livello iniziale [m s.l.m.]	Tempo di ritorno	[anni]	50	100	200
	Portata al colmo in ingresso	[m³/s]	2'144	2'611	3'073
96	Portata di picco laminata	[m ³ /s]	967	1'241	1'305
	Massimo livello d'invaso	[m s.l.m.]	116.42	118.28	120.19
	Differenza tempo di picco tra onda in ingresso e onda laminata	[ore]	7.3	6.7	7.2
100	Portata di picco laminata	[m ³ /s]	1'004	1'269	1'311
	Massimo livello d'invaso	[m s.l.m.]	116.73	118.53	120.48
	Differenza tempo di picco tra onda in ingresso e onda laminata	[ore]	7.0	6.6	7.1
103	Portata di picco laminata	[m ³ /s]	1'030	1'272	1'316
	Massimo livello d'invaso	[m s.l.m.]	116.93	118.72	120.70
	Differenza tempo di picco tra onda in ingresso e onda laminata	[ore]	6.9	6.6	7.1

Dalle tabelle si evidenzia l'elevato effetto di laminazione svolto dall'invaso, con la sostanziale riduzione del colmo della portata laminata rispetto a quella in ingresso al serbatoio.

In particolare, si esaminano e confrontano i risultati ottenuti nelle due configurazioni caratterizzate da livello iniziale di invaso pari a 96 e 100 m s.l.m.: nella seguente tabella si riportano i valori incrementali di portata di picco laminata e la differenza dei tempi di picco rispetto a quelli della configurazione meno cautelativa (100 m s.l.m.).

Tabella 5.4 – Valori incrementali di portata e di differenza di picchi

Livello iniziale	Tempo di ritorno	[anni]	50	100	200
96 m s.l.m.	Portata di picco laminata	[m ³ /s]	-37 (-3.7%)	-28 (-2.2%)	-6 (-0.5%)
	Differenza tempo di picco tra onda in ingresso e onda laminata	[ore]	+0.3 (+4%)	+0.1 (+1%)	+0.1 (+1%)
100 m s.l.m.	Portata di picco laminata	[m ³ /s]	0	0	0
	Differenza tempo di picco tra onda in ingresso e onda laminata	[ore]	0	0	0

Si evidenzia come l'abbassamento della quota d'invaso a 96 m s.l.m. non comporta un significativo beneficio né in termini di riduzione di portata di picco laminata né di sfasamento del picco dell'onda laminata.

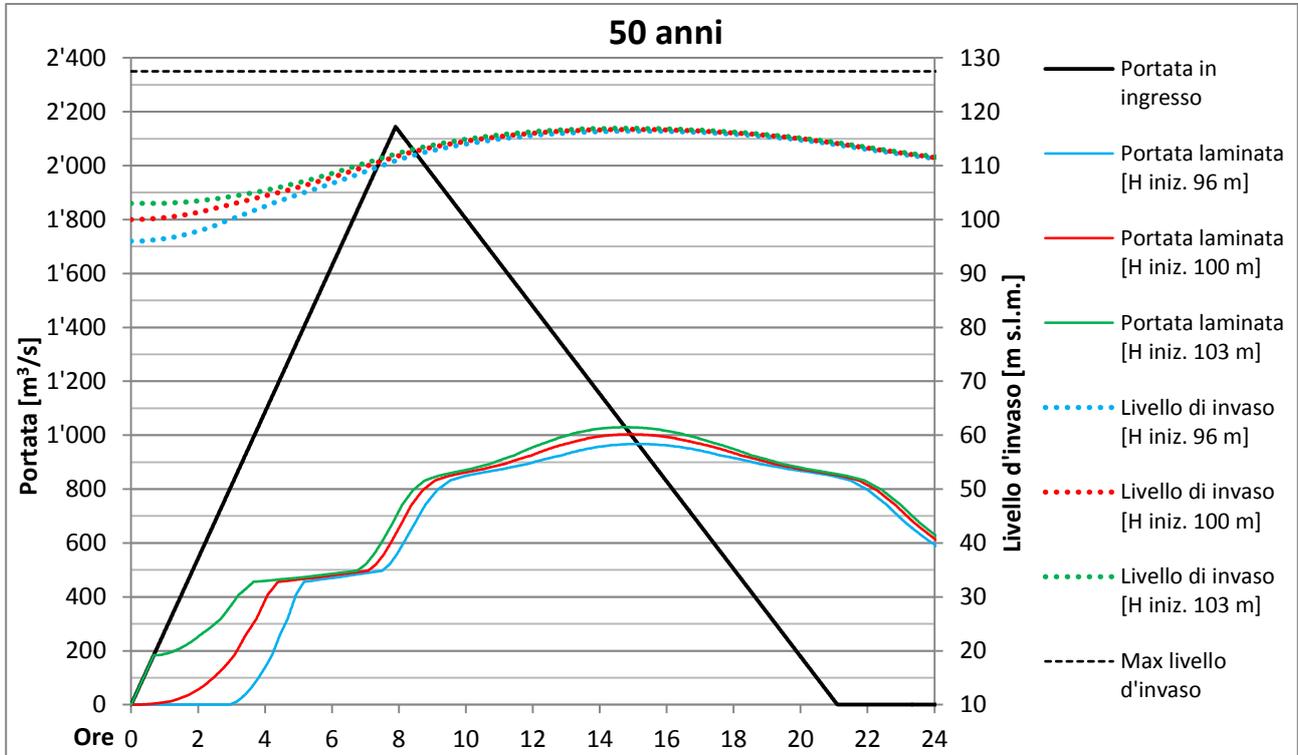


Figura 5.2 – Laminazione Tr = 50 anni

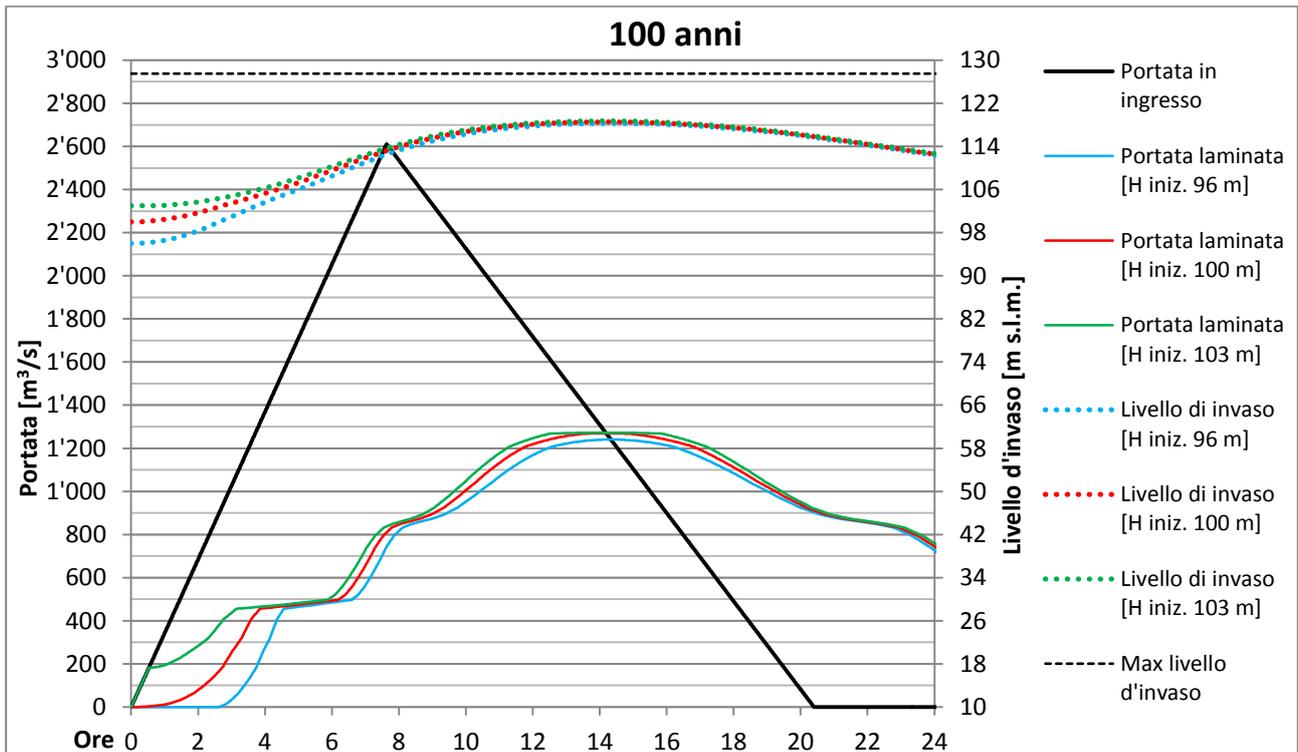


Figura 5.3 – Laminazione Tr = 100 anni

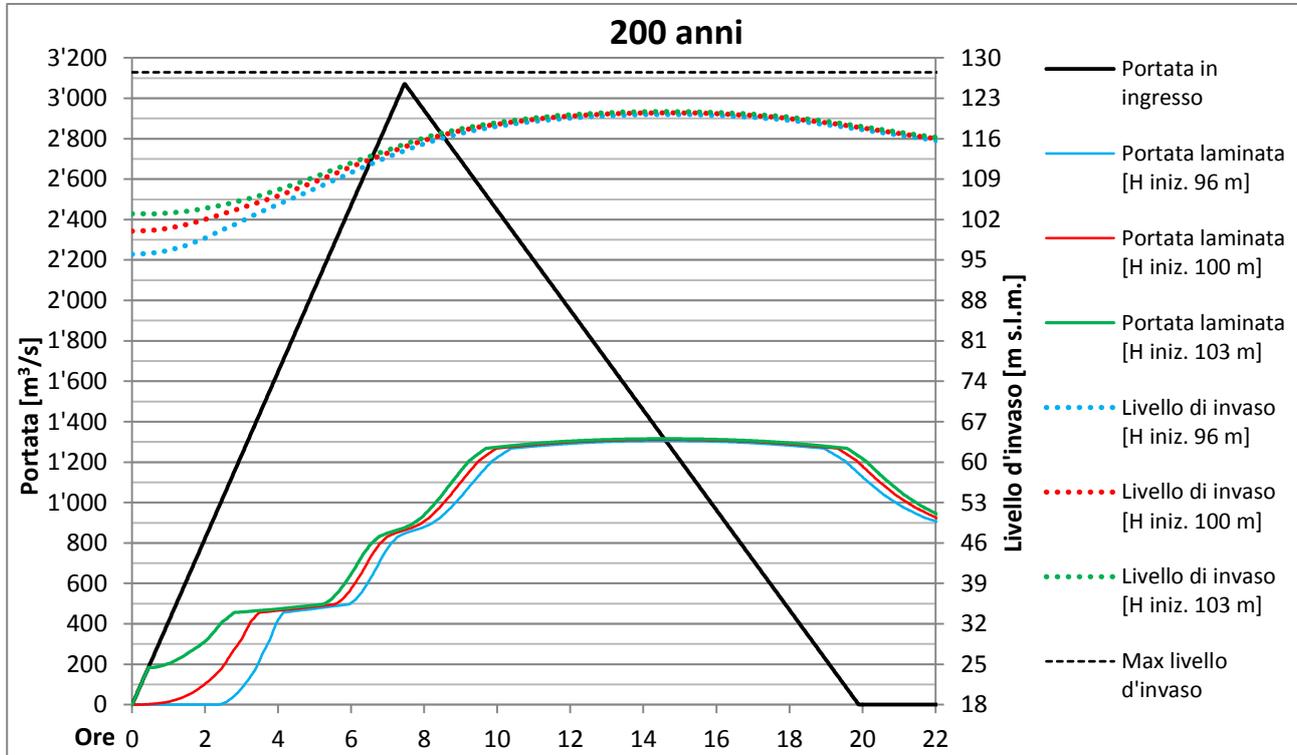


Figura 5.4 – Laminazione $T_r = 200$ anni

Anche dai grafici si evidenzia l'elevata capacità di laminazione realizzato dall'invaso e la poca influenza che determina la riduzione a 96 m s.l.m. del livello iniziale d'invaso nell'ambito della laminazione delle portate di piena con tempi di ritorno maggiori.

5.3 PROPAGAZIONE DELL'ONDA LAMINATA A VALLE

Nel PSFF e nel PRGA la valutazione dell'effetto di laminazione sulle portate al colmo nelle sezioni a valle dello sbarramento è effettuata applicando il cosiddetto "metodo di Marone" per cui, definito il coefficiente di riduzione per la generica sezione i -esima pari a:

$$\varepsilon(i) = 1 - \frac{W_{lam}}{W_{ind}(i)}$$

la portata laminata alla sezione i -esima si ottiene dalla seguente relazione (formula di Marone):

$$Q_{lam}(i) = \varepsilon(i) \cdot Q_{ind}(i)$$

dove:

$Q_{lam}(i)$ portata al colmo dell'onda di piena laminata alla sezione i -esima;

$Q_{ind}(i)$ portata al colmo dell'onda di piena indisturbata (naturale) alla sezione i -esima;



- $\epsilon(i)$ coefficiente di riduzione alla sezione *i-esima*;
 W_{lam} volume di laminazione dell'invaso;
 $W_{ind}(i)$ volume dell'onda di piena indisturbata (naturale) alla sezione *i-esima*.

Pertanto, nelle sezioni a valle diga la stima delle portate di piena, ridotte per effetto della laminazione operata dall'invaso, sono funzione del volume di laminazione dell'invaso e del volume di piena naturale; in particolare all'aumentare del volume di laminazione diminuisce il coefficiente di Marone e conseguentemente anche l'entità della portata al colmo di piena propagata a valle diga.

Il PSFF ha suddiviso il bacino idrografico del fiume Cedrino in 15 sottobacini definiti individuando differenti sezioni di chiusura lungo l'asta principale (Figura 5.6). Le sezioni sono ubicate sulla base della immissione degli affluenti che compongono il reticolo idrografico secondario (Figura 5.5).

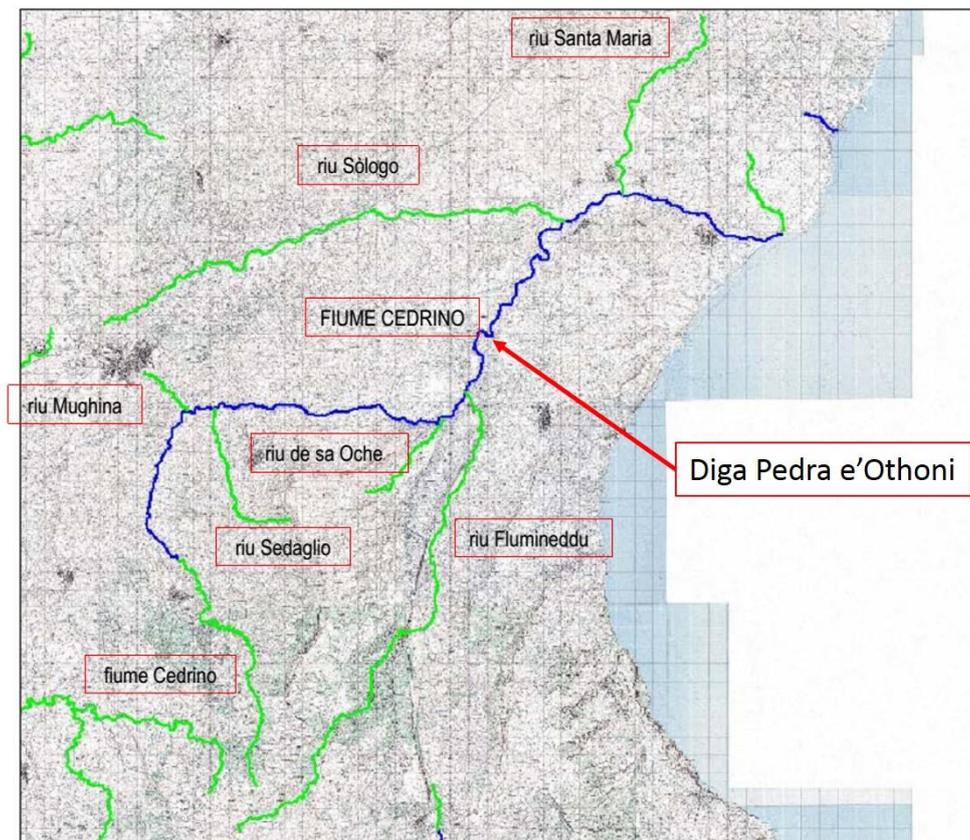


Figura 5.5 – Fiume Cedrino (fonte PSFF)



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

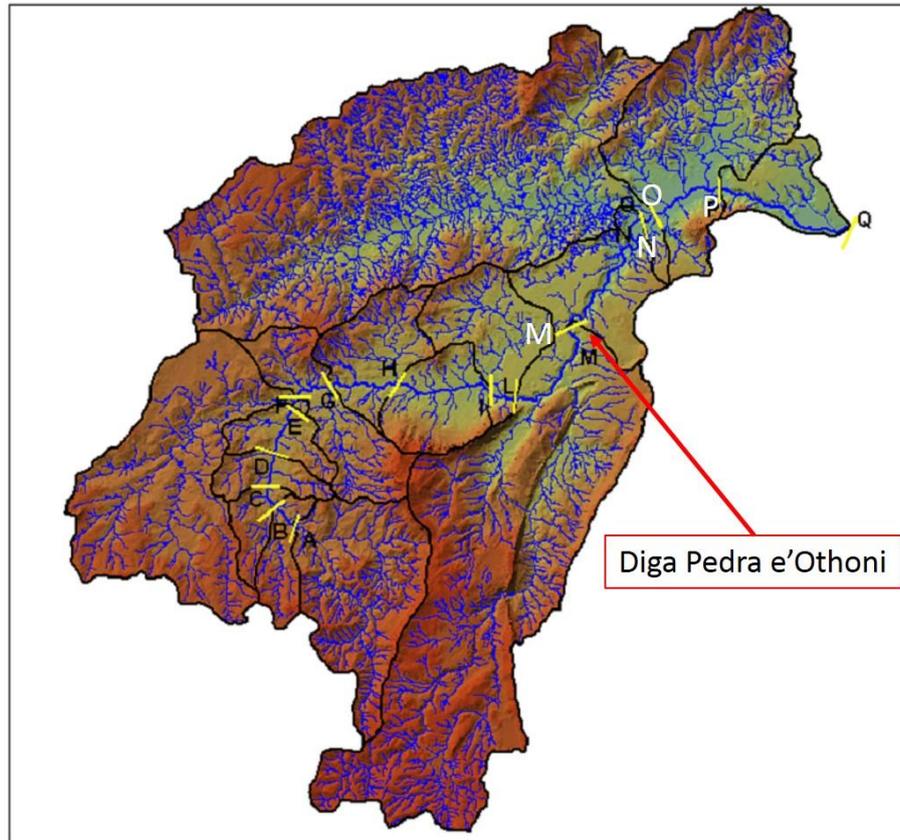


Figura 5.6 – Sezioni del fiume Cedrino (fonte PSFF)

La diga di Pedra e'Othoni è identificata dalla sezione M, pertanto le sezioni a valle diga interessate dall'effetto di laminazione dell'invaso sono le ultime quattro:

- N: sezione a monte della confluenza Cedrino - riu Sologo;
- O: sezione a valle della confluenza Cedrino - riu Sologo;
- P: sezione intermedia O-Q;
- Q: foce del fiume Cedrino.

In Tabella 5.5 si forniscono i valori di portata indisturbata (naturale) nelle sezioni a valle diga, mentre in Tabella 5.6 si riportano i risultati dall'applicazione del metodo di Marone nelle tre configurazioni iniziali d'invaso analizzate.



Tabella 5.5 – Portata indisturbata nelle sezioni a valle diga

		50 anni	100 anni	200 anni	
Portata al colmo	[m ³ /s]	M Pedra 'e Othoni	2'144	2'611	3'073
		N	2'234	2'721	3'204
		O	2'830	3'446	4'057
		P	3'016	3'673	4'324
		Q	3'061	3'729	4'389

Tabella 5.6 – Onda laminata e coefficiente di Marone nelle sezioni a valle diga

Livello iniziale di invaso		Sezione		Tr 50	Tr 100	Tr 200	
96 m s.l.m.	Portata laminata	M Pedra e'Othoni	mc/s	967	1'241	1'305	
		N	-	0.562	0.559	0.547	
	Coefficiente di Marone	O	-	0.701	0.699	0.690	
		P	-	0.739	0.737	0.730	
		Q	-	0.761	0.759	0.752	
		Portata al colmo	N	mc/s	1'256	1'520	1'751
	O		mc/s	1'984	2'407	2'801	
	P		mc/s	2'230	2'708	3'157	
	Q		mc/s	2'329	2'829	3'300	
	100 m s.l.m.	Portata laminata	M Pedra e'Othoni	mc/s	1'004	1'269	1'311
			N	-	0.593	0.586	0.567
		Coefficiente di Marone	O	-	0.722	0.717	0.704
P			-	0.758	0.754	0.742	
Q			-	0.778	0.774	0.763	
Portata al colmo			N	mc/s	1'325	1'595	1'817
		O	mc/s	2'044	2'472	2'858	
		P	mc/s	2'286	2'768	3'209	
		Q	mc/s	2'381	2'885	3'349	
103 m s.l.m.		Portata laminata	M Pedra e'Othoni	mc/s	1'030	1'272	1'316
	N		-	0.627	0.615	0.589	
	Coefficiente di Marone	O	-	0.746	0.737	0.720	
		P	-	0.778	0.771	0.755	
		Q	-	0.796	0.789	0.775	
		Portata al colmo	N	mc/s	1'401	1'672	1'889
	O		mc/s	2'110	2'539	2'920	
	P		mc/s	2'347	2'830	3'267	
	Q		mc/s	2'438	2'943	3'403	



Per evidenziare le differenze tra i risultati ottenuti con le ipotesi di invaso iniziale a quota 96 e 100 m s.l.m., in particolare, si esaminano e confrontano i risultati ottenuti nelle due configurazioni caratterizzate da livello iniziale di invaso pari a 96 e 100 m s.l.m.: nella seguente tabella si riportano i valori incrementali di portata di picco laminata e la differenza dei tempi di picco rispetto a quelli della configurazione meno cautelativa (100 m s.l.m.).

Tabella 5.4 è dato il confronto tra i valori di portata di picco laminata nelle sezioni a valle della diga per le due configurazioni.

Tabella 5.7 – Valori incrementali di portata

Livello iniziale	Tempo di ritorno	Sezione	[anni]	50	100	200
96	Portata al colmo	N	[m ³ /s]	-76 (-5%)	-77 (-5%)	-72 (-4%)
		O	[m ³ /s]	-66 (-3%)	-67 (-3%)	-62 (-2%)
		P	[m ³ /s]	-61 (-3%)	-62 (-2%)	-58 (-2%)
		Q	[m ³ /s]	-57 (-2%)	-58 (-2%)	-54 (-2%)
100	Portata al colmo	N	[m ³ /s]	0	0	0
		O	[m ³ /s]	0	0	0
		P	[m ³ /s]	0	0	0
		Q	[m ³ /s]	0	0	0

Si evidenzia che le differenze tra i risultati ottenuti nelle due configurazioni sono anche a valle della diga estremamente modeste. In definitiva, si ritiene che la riduzione della quota di invaso autorizzato nel periodo autunno-invernale a quota 96 m s.l.m. non procuri un significativo beneficio in termini di riduzione del colmo di piena nelle sezioni vallive.

5.4 TEMPO DI INTERVENTO

Si ricorda che il “tempo di intervento” è definito come l’intervallo temporale che intercorre tra il verificarsi della portata di allerta in ingresso all’invaso e la portata critica laminata dalla diga che mette in condizioni di criticità le sezioni a valle. La valutazione di tale intervallo temporale è di rilevante interesse quando la diga svolge una efficace azione di riduzione delle portate nelle sezioni vallive.

Per l’invaso del Cedrino il Tavolo Tecnico ha ritenuto non significativa la determinazione di tale tempo di intervento in quanto il bacino residuo non controllato a valle dello sbarramento è di dimensioni considerevoli. In particolare si evidenzia l’apporto rilevante dato dal rio Sologo, come si evince dalla Figura 5.5 e Figura 5.6. Il contributo idrologico di tale corso d’acqua, non regolato da alcuna opera di sbarramento, può determinare in maniera indipendente rispetto alla laminazione effettuata dalla diga situazioni di criticità nelle sezioni vallive.



6 Considerazioni conclusive

Nel presente documento sono stati illustrati i risultati delle elaborazioni per la verifica della capacità di laminazione dell'invaso della diga di Pedra e' Othoni sul fiume Cedrino. Le analisi sviluppate per via simulativa dal DICAAR hanno avuto la finalità di fornire le basi per la predisposizione di un documento che possa essere di supporto alla redazione dei "Piani di laminazione statica, anche speditivi", così come definiti sulla base delle decisioni assunte dal Tavolo Tecnico nella riunione del 10 Febbraio 2016 e riportato nel documento in data 16 Febbraio 2016, prot. n. 0001522 dell'Agenzia di Distretto Idrografico della Sardegna.

Sono stati analizzati i risultati ottenuti con le attuali regole gestionali, confrontandoli con quelli ottenuti con l'ulteriore ipotesi di limitazione d'invaso, proposta in sede di Tavolo Tecnico. Inoltre, sono state verificate le possibilità di erogazione tramite la simulazione del sistema di approvvigionamento idrico facente capo all'invaso del Cedrino.

Sono stati, pertanto, considerati due scenari di simulazione:

- scenario A: simulazione del sistema con le attuali regole gestionali;
- scenario B: simulazione del sistema con modifica delle attuali regole gestionali, inserendo limiti di invaso ipotizzati nell'ambito dei lavori del Tavolo Tecnico.

Considerando le serie idrologiche PSURI la simulazione del sistema idrico del Cedrino ha evidenziato la presenza di deficit strutturali per le utenze irrigue, che risultano leggermente superiori nello scenario B, e assenza di criticità per le utenze civile e industriale, qualora si riservi una quota parte del volume del serbatoio per tali utenze prioritarie.

D'altro canto, considerando come input al serbatoio le serie storiche di deflusso SISS-2 si evidenzia, come era prevedibile, la significativa diminuzione dei deficit irrigui, con sostanziale equivalenza dei risultati nei due scenari in esame.

Tabella 6.1 – Deficit alle utenze – Scenario A

Utenza	Serie PSURI		Serie SISS	
	Numero di anni con deficit	Deficit medio negli anni con deficit	Numero di anni con deficit	Deficit medio negli anni con deficit
	[%]	[%]	[%]	[%]
Civile	-	-	-	-
Industriale	-	-	-	-
Irriguo	72%	15.5%	16%	6.2%

Tabella 6.2 – Deficit alle utenze – Scenario B

Utenza	Serie PSURI		Serie SISS	
	Numero di anni con deficit	Deficit medio negli anni con deficit	Numero di anni con deficit	Deficit medio negli anni con deficit
	[%]	[%]	[%]	[%]
Civile	-	-	-	-
Industriale	-	-	-	-
Irriguo	72%	16.7%	16%	6.2%



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA

SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

Nell'ambito della laminazione è stato evidenziato l'importante effetto di riduzione della portata al colmo svolto dall'invaso per le sezioni immediatamente vallive e la trascurabile influenza della variazione della quota a 96 m s.l.m. nel livello iniziale d'invaso, sia in termini di portata al colmo laminata in uscita dalla diga sia del valore stimato nelle sezioni a valle dello sbarramento.

In sintesi, sulla base di quanto emerso dalle analisi sopra illustrate si ritiene di non dover inserire modifiche alle regole gestionali attualmente adottate per l'invaso del Cedrino, anche in considerazione del fatto che una riduzione della quota iniziale al di sotto di 100 m s.l.m. comporterebbe l'utilizzo dello scarico di fondo che, allo stato attuale, è un'operazione non facilmente realizzabile dal gestore.

Allegato A - Procedura di calcolo dell'idrogramma triangolare

Nel PGRA per le valutazioni idrologiche e, pertanto, anche nel presente documento, si sono seguite le indicazioni e le quantificazioni delle portate di piena ai diversi tempi di ritorno date nel PSFF. Si ricorda che per il calcolo dell'idrogramma di piena il PSFF, come esplicitato nell'elaborato "Integrazioni metodologiche"¹, utilizza una metodologia semplificata proposta dal Soil Conservation Service. E' infatti detto in PSFF:

La definizione dell'idrogramma di piena, allorché la portata al colmo è stimata con il metodo diretto (analisi locale o metodo regionale) può essere condotta con tecniche semplificate, quale quella proposta dal SCS. Queste assegnano la forma triangolare dell'idrogramma, ipotizzando che il tempo di base, T_b , sia dato da:

$$T_b = \frac{2 \cdot W}{Q_{\max}}$$

dove W è il volume dell'idrogramma depurato della portata di base e quindi pari al volume di pioggia netta e Q_{\max} la portata al colmo stimata.

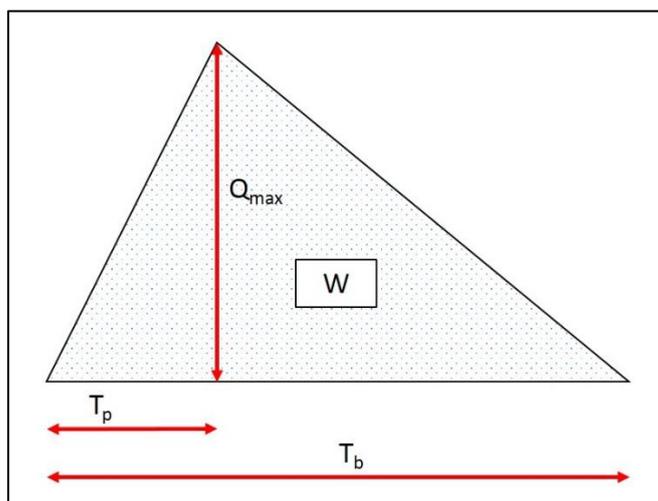


Figura 1 – Idrogramma di forma triangolare di volume W

Il volume dell'idrogramma di piena è calcolato con la metodologia indiretta ricercando l'altezza di pioggia netta che per una durata pari al tempo di corrivazione genera la portata assegnata. Una volta stimato il volume di pioggia netta è quindi possibile calcolare i tempi caratteristici dell'idrogramma note le relazioni:

$$T_p = \frac{T_b}{2.67}$$

$$T_b - T_p = 1.67 \cdot T_p$$

L'idrogramma avrà quindi le seguenti ordinate:

¹ Linee guida per la redazione del progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali. Integrazioni Metodologiche. Regione Autonoma della Sardegna. Assessorato dei Lavori Pubblici. Servizio Difesa del Suolo. 2006



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DI CAGLIARI
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA
SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

$$q(t) = \begin{cases} \frac{Q_{\max}}{T_p} t & 0 \leq t \leq T_p \\ \frac{Q_{\max}}{T_p - T_b} (t - T_b) & T_p \leq t \leq T_b \end{cases}$$

Stima della portata al colmo

Per il calcolo delle portate al colmo attese in bacini di dimensioni superiori a 60 km² il PSFF² fa riferimento al metodo diretto riportata nella Relazione regionale del GNDCI - VAPI per la stima delle delle portate al colmo per la Sardegna, utilizzando la distribuzione probabilistica TCEV³.

Per quanto concerne il primo livello di analisi regionale che contraddistingue la distribuzione probabilistica, si è ritenuto coerente non operare alcuna differenziazione territoriale, pertanto i parametri validi per l'intero regionale sono:

$$\lambda^* = 0.3938$$

$$\vartheta^* = 0.5887$$

Al secondo livello di regionalizzazione è stata effettuata una differenziazione in relazione al versante di appartenenza del bacino in esame, orientale od occidentale, secondo la schematizzazione riportata in Figura 2. Gli ulteriori parametri della distribuzione probabilistica si differenziano quindi in:

$$\text{Bacini occidentali} \quad \lambda_1 = 6.286; \quad \eta = 4.377$$

$$\text{Bacini orientali} \quad \lambda_1 = 4.571; \quad \eta = 4.058$$

² Metodologie di analisi. Studi, indagini, elaborazioni attinenti all'ingegneria integrata, necessari alla redazione dello studio denominato progetto di piano stralcio delle fasce fluviali (PSFF). Regione Autonoma della Sardegna. 2007

³ Cao C., Sechi G.M., Becciu G. (1988). Analisi regionale per la valutazione probabilistica delle piene in Sardegna. XXI Convegno di Idraulica e costruzioni idrauliche. L'Aquila.



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DI CAGLIARI
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA
SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

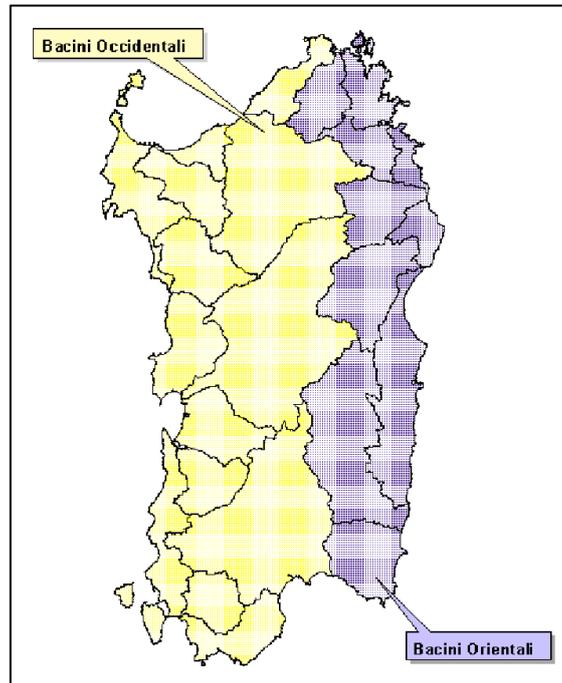


Figura 2 – Suddivisione della Regione Sardegna nei due versanti (Fonte PSFF)

Infine, per quanto riguarda il terzo livello di analisi delle piene, nella struttura gerarchica del modello TCEV si è fatto riferimento all'analisi del parametro modale ε_1 . Il legame teorico tra questo parametro e la piena media annua μ_x è:

$$\mu_x = \frac{\varepsilon_1}{\ln \lambda_1} \eta$$

Il parametro ε_1 risulta funzione della superficie del bacino (A_b) con differenziazione secondo l'esposizione del bacino:

Bacini occidentali $\ln \varepsilon_1 = -1.1954 + 0.9235 \ln A_b$

Bacini orientali $\ln \varepsilon_1 = 0.9882 + 0.6452 \ln A_b$

In termini applicativi, la portata di picco per assegnato tempo di ritorno T viene stimata considerando un fattore di crescita $K(T)$ secondo la seguente relazione:

$$Q(T) = \mu_x \cdot K(T)$$

con

Bacini occidentali $K(T) = -0.833 + 1.345 \ln T$

Bacini orientali $K(T) = -0.977 + 1.451 \ln T$



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DI CAGLIARI
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA
SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

Stima del volume di pioggia netta

Per il calcolo del volume di pioggia netta il PSFF considera la metodologia indiretta, utilizzando la distribuzione TCEV per la stima delle curve di possibilità pluviometrica.

Applicando tale metodologia l'altezza di pioggia indice viene espressa secondo la formula:

$$\mu(\tau) = a_1 \cdot \tau^{n_1}$$

dove i coefficienti a_1 e n_1 vengono determinati in funzione della pioggia indice giornaliera μ_g secondo le relazioni:

$$a_1 = \frac{\mu_g}{0.886 \cdot 24^{n_1}}$$

$$n_1 = -0.493 + 0.476 \cdot \text{Log } \mu_g$$

La pioggia indice giornaliera μ_g viene stimata sulla base della carta delle isoiete rappresentativa della Regione Sardegna.

L'altezza di pioggia $h_T(\tau)$, di durata τ e tempo di ritorno T , si ottiene moltiplicando la pioggia indice $\mu(\tau)$ per il coefficiente di crescita $K_T(\tau) = a_2 \cdot \tau^{n_2}$, ottenendo la relazione:

$$h_T(\tau) = \mu(\tau) \cdot K_T(\tau) = (a_1 \cdot a_2) \cdot \tau^{(n_1+n_2)}$$

dove i coefficienti a_2 e n_2 variano in funzione del tempo di ritorno, della durata della pioggia e della sottozona (SZO) di appartenenza del bacino in esame. Per la valutazione dei parametri si rimanda alle Metodologie di Analisi del PSFF.

La pioggia ottenuta viene quindi ragguagliata all'area tramite il parametro r , secondo la formulazione utilizzata nel VAPI, che fa riferimento al Flood Studies Report:

$$r = 1 - (0,0394 A_b^{0.354}) \tau^{(-0.40+0.0208 \ln(4.6-\ln(A_b)))} \quad \text{per } A_b < 20 \text{ km}$$

$$r = 1 - (0,0394 A_b^{0.354}) \tau^{(-0.40+0.003832 (4.6-\ln(A_b)))} \quad \text{per } A_b > 20 \text{ km}$$

dove

τ : durata della precipitazione;

A_b : superficie del bacino (espressa in km^2).

Assumendo che le perdite iniziali siano pari al 20% del valore massimo delle perdite per infiltrazione nel suolo si ha la seguente equazione per la valutazione complessiva del volume di pioggia netta (R_o) per unità di superficie:

$$R_o = \frac{(h - 0.2 \cdot S)^2}{h + 0.8 \cdot S} \quad [\text{mm}]$$

dove



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DI CAGLIARI
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA
SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

h: precipitazione lorda totale ragguagliata (mm);

S: valore massimo di perdite per infiltrazione (mm), valutato secondo il metodo del Curve Number (CN) del Soil Conservation Service (SCS)⁴:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad [\text{mm}]$$

⁴ SOIL CONSERVATION SERVICE, (1972) National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., U.S.A.

Allegato B - Sintesi della procedura analitica di simulazione del processo di laminazione nell'invaso

Nell'ambito della simulazione del processo di laminazione dell'onda di piena si definisce:

$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$	intervallo di tempo;
$H = h + h_0$	quota di invasore;
h	battente sulle luci di scarico;
h_0	quota della soglia dello scarico;
V_{inv}	volume invasato;
Q_{in}	portata in ingresso all'invaso;
$V_{in} = Q_{in} \cdot \Delta t$	volume in ingresso all'invaso;
Q_{out}	portata in uscita dall'invaso;
$V_{out} = Q_{out} \cdot \Delta t$	volume in uscita dall'invaso.

Si ipotizzano note le seguenti grandezze e relazioni:

Q_{in}	portata in ingresso all'invaso;
$V_{inv} = f(H)$	la curva dei volumi di invasore in funzione delle quote;
$Q_{out} = g(H)$	le leggi di efflusso degli organi di scarico, che mettono in relazione la portata uscente con la quota di invasore.

La definizione dell'idrogramma di piena laminato, in uscita dall'invasore, può quindi essere determinato tramite la simulazione del processo di invasore a partire dalla conoscenza dell'idrogramma in ingresso, delle relazioni tra quota di invasore e volumi invasati e delle leggi di efflusso. Ipotizzando nulle le perdite nei tempi di evento, la procedura è fondamentalmente basata sull'applicazione dell'equazione di continuità all'invasore che, con riferimento ai volumi in un generico istante di tempo *i*-esimo, si può scrivere come:

$$(V_{inv})_i = (V_{inv})_{i-1} + (V_{in})_i - (V_{out})_i$$

L'applicazione della precedente equazione necessita di un procedimento iterativo come esplicitato di seguito.



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA
Direzione Generale Agenzia Regionale del
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DI CAGLIARI
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
ARCHITETTURA
SEZIONE DI INGEGNERIA IDRAULICA

Procedura iterativa

$$1^{\circ} \text{ iterazione} \quad (V_{inv})_i^1 = (V_{inv})_{i-1} + (V_{in})_i$$

$$H_i^1 = f^{-1}(V_{inv})_i^1$$

$$(V_{out})_i^1 = g^{-1}(H)_i^1 \cdot \Delta t$$

$$2^{\circ} \text{ iterazione} \quad (V_{inv})_i^2 = (V_{inv})_{i-1} + (V_{in})_i - (V_{out})_i^1$$

$$H_i^2 = f^{-1}(V_{inv})_i^2$$

$$(V_{out})_i^2 = g^{-1}(H)_i^2 \cdot \Delta t$$

[...]

$$k\text{-esima iterazione} \quad (V_{inv})_i^k = (V_{inv})_{i-1} + (V_{in})_i - (V_{out})_i^k$$

$$H_i^k = f^{-1}(V_{inv})_i^k$$

$$(V_{out})_i^k = g^{-1}(H)_i^k \cdot \Delta t$$

$$\text{STOP iterazioni} \quad \text{if } (V_{inv})_i^n - (V_{inv})_i^{n-1} \cong 0$$

A conclusione della simulazione del processo di laminazione dell'onda di piena nell'invaso si effettua la verifica sulla congruità dei volumi in ingresso ed in uscita, secondo cui:

$$\sum_1^T (V_{in})_i - \sum_1^T (V_{out})_i = (V_{inv})_0 - (V_{inv})_T$$

**Allegato C - Tabelle con valori discreti di portata laminata e di livello
d'invaso con passo temporale di 15'**

Tr = 50 anni - Portate laminate e livelli d'invaso ogni 15'

Tempo di ritorno 50 anni			Livello iniziale d'invaso								
			96 m s.l.m.			100 m s.l.m.			103 m s.l.m.		
Tempo		Portata in ingresso	Portata laminata	Livello d'invaso	Incremento rispetto alla quota iniziale	Portata laminata	Livello d'invaso	Incremento rispetto alla quota iniziale	Portata laminata	Livello d'invaso	Incremento rispetto alla quota iniziale
ore	min	0	mc/s	mc/s	m	mc/s	mc/s	m	mc/s	mc/s	m
0	0	0	0	96.00	0.00	0	100.00	0.00	0	103.00	0.00
0.25	15	68	0	96.02	0.02	1	100.02	0.02	68	103.00	0.00
0.5	30	136	0	96.11	0.11	2	100.08	0.08	136	103.00	0.00
0.75	45	204	0	96.25	0.25	5	100.19	0.19	184	103.00	0.00
1	60	271	0	96.46	0.46	9	100.35	0.35	189	103.03	0.03
1.25	75	339	0	96.72	0.72	15	100.54	0.54	198	103.09	0.09
1.5	90	407	0	97.03	1.03	25	100.77	0.77	211	103.18	0.18
1.75	105	475	0	97.41	1.41	38	101.04	1.04	231	103.31	0.31
2	120	543	0	97.84	1.84	56	101.35	1.35	253	103.46	0.46
2.25	135	611	0	98.33	2.33	78	101.68	1.68	275	103.63	0.63
2.5	150	678	0	98.88	2.88	105	102.05	2.05	300	103.83	0.83
2.75	165	746	0	99.48	3.48	135	102.44	2.44	330	104.05	1.05
3	180	814	3	100.11	4.11	171	102.85	2.85	371	104.29	1.29
3.25	195	882	21	100.67	4.67	220	103.24	3.24	411	104.54	1.54
3.5	210	950	51	101.25	5.25	273	103.61	3.61	438	104.82	1.82
3.75	225	1018	90	101.85	5.85	320	103.99	3.99	457	105.10	2.10
4	240	1086	138	102.47	6.47	386	104.38	4.38	459	105.40	2.40
4.25	255	1153	196	103.08	7.08	434	104.78	4.78	462	105.73	2.73
4.5	270	1221	273	103.61	7.61	457	105.17	5.17	466	106.08	3.08
4.75	285	1289	345	104.14	8.14	461	105.57	5.57	468	106.45	3.45
5	300	1357	423	104.66	8.66	465	105.99	5.99	471	106.84	3.84
5.25	315	1425	457	105.17	9.17	468	106.43	6.43	474	107.25	4.25
5.5	330	1493	462	105.67	9.67	471	106.88	6.88	478	107.68	4.68
5.75	345	1561	466	106.18	10.18	475	107.35	7.35	482	108.12	5.12
6	360	1628	470	106.71	10.71	479	107.83	7.83	486	108.57	5.57
6.25	375	1696	474	107.24	11.24	483	108.31	8.31	489	109.04	6.04
6.5	390	1764	479	107.78	11.78	488	108.82	8.82	493	109.50	6.50
6.75	405	1832	484	108.33	12.33	492	109.32	9.32	497	109.99	6.99
7	420	1900	488	108.88	12.88	496	109.84	9.84	520	110.48	7.48
7.25	435	1968	492	109.43	13.43	514	110.35	10.35	558	110.96	7.96
7.5	450	2035	497	110.00	14.00	550	110.86	10.86	607	111.43	8.43
7.75	465	2103	525	110.55	14.55	599	111.36	11.36	660	111.89	8.89
8	480	2128	571	111.09	15.09	655	111.85	11.85	719	112.34	9.34
8.25	495	2087	625	111.59	15.59	712	112.29	12.29	768	112.75	9.75
8.5	510	2047	678	112.04	16.04	762	112.69	12.69	804	113.12	10.12
8.75	525	2006	733	112.44	16.44	799	113.06	13.06	830	113.47	10.47
9	540	1965	774	112.81	16.81	825	113.40	13.40	842	113.79	10.79
9.25	555	1925	806	113.15	17.15	839	113.71	13.71	851	114.09	11.09
9.5	570	1884	829	113.46	17.46	849	114.00	14.00	858	114.36	11.36
9.75	585	1844	841	113.75	17.75	856	114.27	14.27	865	114.62	11.62
10	600	1803	849	114.01	18.01	862	114.52	14.52	871	114.87	11.87
10.25	615	1762	856	114.26	18.26	868	114.76	14.76	878	115.11	12.11
10.5	630	1722	861	114.49	18.49	874	114.99	14.99	886	115.32	12.32
10.75	645	1681	867	114.71	18.71	881	115.19	15.19	894	115.52	12.52
11	660	1640	872	114.92	18.92	889	115.39	15.39	906	115.71	12.71
11.25	675	1600	878	115.11	19.11	897	115.57	15.57	917	115.88	12.88
11.5	690	1559	885	115.28	19.28	908	115.73	15.73	928	116.03	13.03
11.75	705	1519	891	115.44	19.44	917	115.88	15.88	942	116.17	13.17
12	720	1478	899	115.59	19.59	927	116.02	16.02	955	116.30	13.30
12.25	735	1437	907	115.72	19.72	939	116.14	16.14	967	116.42	13.42
12.5	750	1397	915	115.85	19.85	950	116.25	16.25	978	116.52	13.52
12.75	765	1356	922	115.96	19.96	960	116.35	16.35	989	116.61	13.61
13	780	1316	930	116.05	20.05	968	116.43	16.43	998	116.68	13.68
13.25	795	1275	939	116.14	20.14	976	116.51	16.51	1007	116.75	13.75
13.5	810	1234	946	116.21	20.21	984	116.57	16.57	1013	116.80	13.80
13.75	825	1194	952	116.27	20.27	990	116.62	16.62	1020	116.85	13.85
14	840	1153	957	116.32	20.32	995	116.66	16.66	1024	116.88	13.88
14.25	855	1113	961	116.36	20.36	999	116.69	16.69	1027	116.91	13.91
14.5	870	1072	964	116.39	20.39	1002	116.71	16.71	1029	116.92	13.92
14.75	885	1031	966	116.41	20.41	1003	116.72	16.72	1030	116.93	13.93
15	900	991	967	116.42	20.42	1003	116.72	16.72	1029	116.92	13.92
15.25	915	950	967	116.42	20.42	1003	116.72	16.72	1027	116.91	13.91
15.5	930	910	966	116.41	20.41	1001	116.70	16.70	1025	116.89	13.89
15.75	945	869	965	116.40	20.40	998	116.68	16.68	1021	116.86	13.86
16	960	828	962	116.37	20.37	993	116.64	16.64	1016	116.82	13.82
16.25	975	788	958	116.33	20.33	988	116.60	16.60	1010	116.77	13.77
16.5	990	747	954	116.29	20.29	981	116.55	16.55	1003	116.72	13.72
16.75	1005	707	949	116.24	20.24	975	116.50	16.50	995	116.66	13.66
17	1020	666	943	116.18	20.18	968	116.43	16.43	987	116.59	13.59
17.25	1035	625	936	116.11	20.11	961	116.36	16.36	976	116.51	13.51
17.5	1050	585	928	116.03	20.03	953	116.28	16.28	968	116.43	13.43
17.75	1065	544	922	115.95	19.95	944	116.19	16.19	959	116.34	13.34
18	1080	504	915	115.85	19.85	934	116.09	16.09	949	116.24	13.24
18.25	1095	463	909	115.75	19.75	924	115.99	15.99	938	116.13	13.13
18.5	1110	422	902	115.64	19.64	917	115.87	15.87	927	116.02	13.02
18.75	1125	382	894	115.52	19.52	909	115.75	15.75	918	115.89	12.89
19	1140	341	889	115.39	19.39	901	115.62	15.62	910	115.76	12.76
19.25	1155	300	884	115.25	19.25	892	115.48	15.48	901	115.62	12.62
19.5	1170	260	878	115.10	19.10	887	115.33	15.33	892	115.47	12.47
19.75	1185	219	873	114.94	18.94	880	115.17	15.17	886	115.31	12.31
20	1200	179	868	114.76	18.76	874	115.00	15.00	879	115.14	12.14
20.25	1215	138	864	114.58	18.58	869	114.81	14.81	873	114.96	11.96
20.5	1230	97	859	114.38	18.38	864	114.61	14.61	868	114.76	11.76
20.75	1245	57	854	114.18	18.18	859	114.41	14.41	863	114.55	11.55
21	1260	16	848	113.96	17.96	854	114.19	14.19	858	114.34	11.34
21.25	1275	0	840	113.73	17.73	848	113.97	13.97	852	114.11	11.11
21.5	1290	0	832	113.50	17.50	840	113.73	13.73	845	113.88	10.88
21.75	1305	0	814	113.26	17.26	832	113.50	13.50	837	113.65	10.65
22	1320	0	797	113.03	17.03	815	113.27	13.27	826	113.42	10.42
22.25	1335	0	773	112.80	16.80	798	113.04	13.04	808	113.18	10.18
22.5	1350	0	749	112.57	16.57	773	112.80	12.80	790	112.95	9.95
22.75	1365	0	721	112.35	16.35	750	112.58	12.58	765	112.72	9.72
23	1380	0	691	112.13	16.13	722	112.36	12.36	741	112.50	9.50
23.25	1395	0	664	111.92	15.92	692	112.14	12.14	711	112.28	9.28
23.5	1410	0	639	111.71	15.71	665	111.93	11.93	681	112.06	9.06
23.75	1425	0	615	111.51	15.51	640	111.72	11.72	655	111.85	8.85
24	1440	0	594	111.31	15.31	616	111.52	11.52	632	111.65	8.65

Tr = 100 anni - Portate laminate e livelli d'invaso ogni 15'

Tempo di ritorno 100 anni			Livello iniziale d'invaso								
			96 m s.l.m.			100 m s.l.m.			103 m s.l.m.		
Tempo		Portata in ingresso	Portata laminata	Livello d'invaso	Incremento rispetto alla quota iniziale	Portata laminata	Livello d'invaso	Incremento rispetto alla quota iniziale	Portata laminata	Livello d'invaso	Incremento rispetto alla quota iniziale
ore	min	0	mc/s	mc/s	m	mc/s	mc/s	m	mc/s	mc/s	m
0	0	0	0	96.00	0.00	0	100.00	0.00	0	103.00	0.00
0.25	15	86	0	96.03	0.03	1	100.02	0.02	86	103.00	0.00
0.5	30	171	0	96.14	0.14	3	100.11	0.11	171	103.00	0.00
0.75	45	257	0	96.32	0.32	6	100.24	0.24	186	103.01	0.01
1	60	342	0	96.58	0.58	11	100.44	0.44	194	103.07	0.07
1.25	75	428	0	96.90	0.90	21	100.68	0.68	210	103.17	0.17
1.5	90	513	0	97.30	1.30	35	100.97	0.97	231	103.31	0.31
1.75	105	599	0	97.78	1.78	54	101.31	1.31	257	103.49	0.49
2	120	684	0	98.32	2.32	79	101.69	1.69	284	103.70	0.70
2.25	135	770	0	98.94	2.94	110	102.11	2.11	312	103.93	0.93
2.5	150	856	0	99.63	3.63	145	102.56	2.56	355	104.20	1.20
2.75	165	941	8	100.30	4.30	189	103.03	3.03	405	104.49	1.49
3	180	1027	33	100.94	4.94	253	103.46	3.46	436	104.80	1.80
3.25	195	1112	73	101.61	5.61	309	103.90	3.90	457	105.13	2.13
3.5	210	1198	125	102.31	6.31	381	104.35	4.35	460	105.49	2.49
3.75	225	1283	187	103.02	7.02	437	104.81	4.81	464	105.87	2.87
4	240	1369	275	103.63	7.63	458	105.27	5.27	467	106.28	3.28
4.25	255	1454	362	104.24	8.24	462	105.74	5.74	470	106.72	3.72
4.5	270	1540	441	104.85	8.85	467	106.24	6.24	474	107.18	4.18
4.75	285	1625	459	105.43	9.43	470	106.76	6.76	478	107.66	4.66
5	300	1711	465	106.02	10.02	475	107.29	7.29	482	108.16	5.16
5.25	315	1797	469	106.62	10.62	480	107.84	7.84	486	108.67	5.67
5.5	330	1882	474	107.24	11.24	484	108.40	8.40	491	109.20	6.20
5.75	345	1968	480	107.86	11.86	489	108.98	8.98	495	109.74	6.74
6	360	2053	485	108.49	12.49	493	109.55	9.55	511	110.29	7.29
6.25	375	2139	490	109.13	13.13	504	110.14	10.14	547	110.83	7.83
6.5	390	2224	495	109.76	13.76	539	110.73	10.73	600	111.37	8.37
6.75	405	2310	516	110.40	14.40	593	111.30	11.30	661	111.90	8.90
7	420	2395	564	111.03	15.03	656	111.86	11.86	729	112.41	9.41
7.25	435	2481	629	111.63	15.63	727	112.40	12.40	785	112.91	9.91
7.5	450	2567	703	112.22	16.22	787	112.93	12.93	825	113.41	10.41
7.75	465	2586	771	112.78	16.78	828	113.44	13.44	846	113.90	10.90
8	480	2535	816	113.29	17.29	846	113.92	13.92	858	114.35	11.35
8.25	495	2484	841	113.76	17.76	858	114.36	14.36	869	114.78	11.78
8.5	510	2433	854	114.20	18.20	869	114.78	14.78	881	115.19	12.19
8.75	525	2382	864	114.60	18.60	880	115.17	15.17	897	115.57	12.57
9	540	2331	874	114.99	18.99	896	115.54	15.54	919	115.91	12.91
9.25	555	2280	887	115.35	19.35	917	115.87	15.87	949	116.24	13.24
9.5	570	2229	905	115.68	19.68	943	116.18	16.18	979	116.53	13.53
9.75	585	2178	924	115.99	19.99	972	116.47	16.47	1015	116.81	13.81
10	600	2126	952	116.27	20.27	1006	116.74	16.74	1047	117.05	14.05
10.25	615	2075	980	116.54	20.54	1036	116.98	16.98	1084	117.28	14.28
10.5	630	2024	1010	116.77	20.77	1071	117.20	17.20	1117	117.49	14.49
10.75	645	1973	1038	116.99	20.99	1101	117.39	17.39	1149	117.67	14.67
11	660	1922	1069	117.19	21.19	1131	117.57	17.57	1176	117.83	14.83
11.25	675	1871	1097	117.36	21.36	1159	117.73	17.73	1203	117.98	14.98
11.5	690	1820	1122	117.52	21.52	1183	117.87	17.87	1220	118.11	15.11
11.75	705	1769	1147	117.66	21.66	1206	118.00	18.00	1235	118.23	15.23
12	720	1717	1168	117.78	21.78	1218	118.10	18.10	1247	118.33	15.33
12.25	735	1666	1187	117.89	21.89	1231	118.20	18.20	1258	118.42	15.42
12.5	750	1615	1203	117.98	21.98	1241	118.28	18.28	1267	118.49	15.49
12.75	765	1564	1213	118.06	22.06	1249	118.35	18.35	1269	118.56	15.56
13	780	1513	1222	118.13	22.13	1257	118.41	18.41	1270	118.61	15.61
13.25	795	1462	1228	118.18	22.18	1263	118.46	18.46	1271	118.65	15.65
13.5	810	1411	1233	118.22	22.22	1267	118.49	18.49	1272	118.68	15.68
13.75	825	1360	1237	118.25	22.25	1268	118.51	18.51	1272	118.71	15.71
14	840	1309	1239	118.27	22.27	1269	118.53	18.53	1272	118.72	15.72
14.25	855	1257	1241	118.28	22.28	1269	118.53	18.53	1272	118.72	15.72
14.5	870	1206	1241	118.28	22.28	1268	118.52	18.52	1272	118.71	15.71
14.75	885	1155	1239	118.27	22.27	1268	118.50	18.50	1272	118.70	15.70
15	900	1104	1236	118.24	22.24	1266	118.48	18.48	1271	118.67	15.67
15.25	915	1053	1232	118.21	22.21	1261	118.44	18.44	1271	118.63	15.63
15.5	930	1002	1227	118.17	22.17	1254	118.39	18.39	1270	118.58	15.58
15.75	945	951	1221	118.12	22.12	1248	118.34	18.34	1268	118.52	15.52
16	960	900	1213	118.06	22.06	1239	118.27	18.27	1263	118.46	15.46
16.25	975	849	1204	117.99	21.99	1231	118.20	18.20	1253	118.38	15.38
16.5	990	797	1190	117.91	21.91	1221	118.12	18.12	1242	118.29	15.29
16.75	1005	746	1176	117.83	21.83	1210	118.03	18.03	1231	118.20	15.20
17	1020	695	1159	117.73	21.73	1194	117.93	17.93	1217	118.09	15.09
17.25	1035	644	1142	117.63	21.63	1175	117.82	17.82	1203	117.98	14.98
17.5	1050	593	1124	117.53	21.53	1154	117.70	17.70	1182	117.86	14.86
17.75	1065	542	1105	117.41	21.41	1133	117.58	17.58	1161	117.74	14.74
18	1080	491	1084	117.28	21.28	1111	117.45	17.45	1136	117.60	14.60
18.25	1095	440	1063	117.15	21.15	1090	117.32	17.32	1113	117.46	14.46
18.5	1110	388	1041	117.01	21.01	1066	117.17	17.17	1090	117.32	14.32
18.75	1125	337	1021	116.86	20.86	1042	117.02	17.02	1065	117.16	14.16
19	1140	286	1002	116.71	20.71	1021	116.86	16.86	1039	117.00	14.00
19.25	1155	235	980	116.54	20.54	999	116.69	16.69	1017	116.83	13.83
19.5	1170	184	962	116.37	20.37	978	116.52	16.52	994	116.65	13.65
19.75	1185	133	943	116.18	20.18	958	116.33	16.33	971	116.46	13.46
20	1200	82	924	115.99	19.99	939	116.14	16.14	951	116.26	13.26
20.25	1215	31	911	115.78	19.78	921	115.93	15.93	931	116.06	13.06
20.5	1230	0	897	115.57	19.57	906	115.71	15.71	915	115.84	12.84
20.75	1245	0	887	115.35	19.35	893	115.50	15.50	901	115.62	12.62
21	1260	0	879	115.13	19.13	885	115.28	15.28	889	115.40	12.40
21.25	1275	0	872	114.90	18.90	876	115.06	15.06	881	115.18	12.18
21.5	1290	0	866	114.68	18.68	870	114.83	14.83	873	114.96	11.96
21.75	1305	0	860	114.45	18.45	864	114.60	14.60	868	114.74	11.74
22	1320	0	855	114.22	18.22	859	114.38	14.38	862	114.51	11.51
22.25	1335	0	849	114.00	18.00	853	114.15	14.15	856	114.28	11.28
22.5	1350	0	841	113.77	17.77	847	113.93	13.93	851	114.06	11.06
22.75	1365	0	833	113.54	17.54	838	113.69	13.69	843	113.83	10.83
23	1380	0	817	113.30	17.30	829	113.46	13.46	835	113.60	10.60
23.25	1395	0	800	113.07	17.07	812	113.23	13.23	822	113.36	10.36
23.5	1410	0	778	112.84	16.84	795	113.00	13.00	805	113.13	10.13
23.75	1425	0	753	112.61	16.61	769	112.76	12.76	784	112.90	9.90
24	1440	0	726	112.39	16.39	745	112.54	12.54	759	112.67	9.67

Tr = 200 anni - Portate laminate e livelli d'invaso ogni 15'

Tempo di ritorno 200 anni			Livello iniziale d'invaso								
			96 m s.l.m.			100 m s.l.m.			103 m s.l.m.		
Tempo		Portata in ingresso	Portata laminata	Livello d'invaso	Incremento rispetto alla quota iniziale	Portata laminata	Livello d'invaso	Incremento rispetto alla quota iniziale	Portata laminata	Livello d'invaso	Incremento rispetto alla quota iniziale
ore	min	0	mc/s	mc/s	m	mc/s	mc/s	m	mc/s	mc/s	m
0	0	0	0	96.00	0.00	0	100.00	0.00	0	103.00	0.00
0.25	15	103	0	96.04	0.04	1	100.03	0.03	103	103.00	0.00
0.5	30	206	0	96.17	0.17	3	100.13	0.13	184	103.00	0.00
0.75	45	309	0	96.39	0.39	8	100.30	0.30	190	103.04	0.04
1	60	412	0	96.70	0.70	14	100.53	0.53	203	103.13	0.13
1.25	75	515	0	97.09	1.09	28	100.82	0.82	224	103.27	0.27
1.5	90	618	0	97.57	1.57	46	101.17	1.17	252	103.45	0.45
1.75	105	721	0	98.14	2.14	70	101.57	1.57	281	103.68	0.68
2	120	824	0	98.80	2.80	103	102.02	2.02	314	103.94	0.94
2.25	135	927	0	99.54	3.54	142	102.52	2.52	362	104.24	1.24
2.5	150	1030	8	100.29	4.29	192	103.05	3.05	414	104.57	1.57
2.75	165	1133	36	100.99	4.99	261	103.52	3.52	449	104.93	1.93
3	180	1236	82	101.73	5.73	324	104.02	4.02	458	105.30	2.30
3.25	195	1339	141	102.51	6.51	410	104.53	4.53	462	105.71	2.71
3.5	210	1442	223	103.26	7.26	456	105.06	5.06	466	106.16	3.16
3.75	225	1545	314	103.94	7.94	461	105.58	5.58	469	106.64	3.64
4	240	1648	419	104.62	8.62	466	106.13	6.13	473	107.15	4.15
4.25	255	1751	458	105.29	9.29	470	106.70	6.70	478	107.68	4.68
4.5	270	1854	465	105.95	9.95	475	107.30	7.30	483	108.23	5.23
4.75	285	1957	469	106.63	10.63	480	107.91	7.91	487	108.81	5.81
5	300	2060	475	107.32	11.32	485	108.53	8.53	492	109.39	6.39
5.25	315	2163	481	108.02	12.02	490	109.17	9.17	497	110.00	7.00
5.5	330	2266	487	108.72	12.72	496	109.82	9.82	529	110.60	7.60
5.75	345	2369	492	109.42	13.42	520	110.48	10.48	582	111.20	8.20
6	360	2472	504	110.14	14.14	574	111.12	11.12	647	111.78	8.78
6.25	375	2575	548	110.84	14.84	642	111.74	11.74	722	112.36	9.36
6.5	390	2678	616	111.52	15.52	721	112.35	12.35	786	112.92	9.92
6.75	405	2781	696	112.17	16.17	789	112.94	12.94	830	113.47	10.47
7	420	2884	774	112.81	16.81	833	113.52	13.52	850	114.02	11.02
7.25	435	2986	826	113.42	17.42	851	114.09	14.09	863	114.57	11.57
7.5	450	3063	850	114.03	18.03	866	114.66	14.66	879	115.13	12.13
7.75	465	3001	864	114.60	18.60	882	115.22	15.22	903	115.66	12.66
8	480	2940	880	115.15	19.15	908	115.73	15.73	939	116.14	13.14
8.25	495	2878	902	115.64	19.64	945	116.20	16.20	987	116.59	13.59
8.5	510	2816	935	116.10	20.10	992	116.63	16.63	1039	117.00	14.00
8.75	525	2754	979	116.53	20.53	1044	117.03	17.03	1100	117.38	14.38
9	540	2693	1027	116.91	20.91	1100	117.38	17.38	1157	117.72	14.72
9.25	555	2631	1082	117.27	21.27	1156	117.71	17.71	1208	118.02	15.02
9.5	570	2569	1135	117.59	21.59	1207	118.01	18.01	1243	118.30	15.30
9.75	585	2507	1185	117.88	21.88	1239	118.27	18.27	1269	118.56	15.56
10	600	2446	1223	118.14	22.14	1268	118.52	18.52	1274	118.80	15.80
10.25	615	2384	1253	118.38	22.38	1273	118.75	18.75	1278	119.02	16.02
10.5	630	2322	1270	118.60	22.60	1277	118.96	18.96	1283	119.22	16.22
10.75	645	2260	1274	118.80	22.80	1281	119.15	19.15	1287	119.41	16.41
11	660	2199	1278	118.98	22.98	1286	119.33	19.33	1292	119.59	16.59
11.25	675	2137	1281	119.15	23.15	1289	119.49	19.49	1295	119.75	16.75
11.5	690	2075	1285	119.30	23.30	1293	119.65	19.65	1299	119.90	16.90
11.75	705	2013	1288	119.45	23.45	1296	119.79	19.79	1302	120.04	17.04
12	720	1952	1291	119.58	23.58	1299	119.91	19.91	1304	120.15	17.15
12.25	735	1890	1294	119.69	23.69	1302	120.03	20.03	1306	120.25	17.25
12.5	750	1828	1296	119.80	23.80	1304	120.12	20.12	1308	120.34	17.34
12.75	765	1766	1298	119.89	23.89	1305	120.20	20.20	1310	120.43	17.43
13	780	1704	1301	119.98	23.98	1307	120.27	20.27	1312	120.50	17.50
13.25	795	1643	1302	120.04	24.04	1308	120.33	20.33	1313	120.56	17.56
13.5	810	1581	1303	120.09	24.09	1309	120.39	20.39	1314	120.61	17.61
13.75	825	1519	1304	120.13	24.13	1310	120.43	20.43	1315	120.65	17.65
14	840	1457	1304	120.16	24.16	1311	120.46	20.46	1315	120.68	17.68
14.25	855	1396	1305	120.18	24.18	1311	120.47	20.47	1316	120.69	17.69
14.5	870	1334	1305	120.19	24.19	1311	120.48	20.48	1316	120.70	17.70
14.75	885	1272	1305	120.19	24.19	1311	120.48	20.48	1316	120.70	17.70
15	900	1210	1305	120.18	24.18	1311	120.47	20.47	1316	120.69	17.69
15.25	915	1149	1304	120.16	24.16	1311	120.45	20.45	1315	120.67	17.67
15.5	930	1087	1304	120.13	24.13	1310	120.42	20.42	1314	120.63	17.63
15.75	945	1025	1303	120.09	24.09	1309	120.37	20.37	1314	120.59	17.59
16	960	963	1302	120.04	24.04	1308	120.32	20.32	1312	120.54	17.54
16.25	975	902	1300	119.97	23.97	1307	120.26	20.26	1311	120.47	17.47
16.5	990	840	1298	119.89	23.89	1305	120.19	20.19	1309	120.40	17.40
16.75	1005	778	1296	119.80	23.80	1303	120.10	20.10	1308	120.32	17.32
17	1020	716	1294	119.70	23.70	1301	120.01	20.01	1306	120.22	17.22
17.25	1035	655	1292	119.59	23.59	1299	119.90	19.90	1304	120.12	17.12
17.5	1050	593	1289	119.46	23.46	1296	119.77	19.77	1301	120.01	17.01
17.75	1065	531	1285	119.32	23.32	1292	119.63	19.63	1298	119.87	16.87
18	1080	469	1282	119.18	23.18	1289	119.49	19.49	1295	119.72	16.72
18.25	1095	408	1278	119.02	23.02	1286	119.33	19.33	1291	119.56	16.56
18.5	1110	346	1275	118.84	22.84	1282	119.16	19.16	1287	119.39	16.39
18.75	1125	284	1271	118.66	22.66	1278	118.98	18.98	1283	119.21	16.21
19	1140	222	1262	118.45	22.45	1273	118.77	18.77	1278	119.01	16.01
19.25	1155	161	1236	118.24	22.24	1269	118.56	18.56	1274	118.80	15.80
19.5	1170	99	1208	118.02	22.02	1247	118.33	18.33	1270	118.58	15.58
19.75	1185	37	1168	117.78	21.78	1218	118.10	18.10	1248	118.34	15.34
20	1200	0	1126	117.54	21.54	1180	117.85	17.85	1217	118.09	15.09
20.25	1215	0	1089	117.31	21.31	1138	117.61	17.61	1178	117.84	14.84
20.5	1230	0	1050	117.07	21.07	1098	117.37	17.37	1136	117.60	14.60
20.75	1245	0	1019	116.84	20.84	1060	117.13	17.13	1097	117.36	14.36
21	1260	0	990	116.62	20.62	1027	116.91	16.91	1058	117.12	14.12
21.25	1275	0	965	116.40	20.40	998	116.68	16.68	1026	116.90	13.90
21.5	1290	0	942	116.17	20.17	971	116.46	16.46	997	116.67	13.67
21.75	1305	0	922	115.96	19.96	948	116.23	16.23	970	116.45	13.45
22	1320	0	908	115.74	19.74	926	116.01	16.01	947	116.22	13.22
22.25	1335	0	894	115.52	19.52	912	115.79	15.79	926	116.01	13.01
22.5	1350	0	885	115.30	19.30	898	115.58	15.58	912	115.79	12.79
22.75	1365	0	877	115.08	19.08	888	115.36	15.36	897	115.57	12.57
23	1380	0	870	114.85	18.85	879	115.14	15.14	887	115.35	12.35
23.25	1395	0	865	114.63	18.63	872	114.92	14.92	879	115.13	12.13
23.5	1410	0	859	114.40	18.40	866	114.69	14.69	872	114.91	11.91
23.75	1425	0	854	114.18	18.18	861	114.46	14.46	866	114.68	11.68
24	1440	0	847	113.95	17.95	855	114.24	14.24	860	114.45	11.45