

Cliente Enel Produzione SpA

Oggetto Progetto per il recupero ambientale della miniera di Santa Barbara nei comuni di Cavriglia (AR) e Figline Valdarno (FI)

Aggiornamento dell'analisi modellistica del bilancio idrico e della qualità delle acque dei bacini dei laghi Castelnuovo, Allori e San Cipriano

Ordine Accordo Quadro Enel Produzione n. 8400051749 del 07/11/11 – Fornitura di servizi specialistici in campo ambientale, civile e idraulico e diagnostica specialistica 2011-2013 Attingimento A.Q. N. 4000313742 del 25/05/2012

Note Rev. 0 (AG12ESS062 – Lettera n. B3018868)

PAD B3018674 (1826222) - USO RISERVATO

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

N. pagine 86 **N. pagine fuori testo** -

Data 10/07/2013

Elaborato ESS - Passeri Valentina, ESS - Bozzani Amedeo Aldo
B3018674 494514 AUT B3018674 3478 AUT

Verificato ESS - Sala Maurizio
B3018674 3741 VER

Approvato ESS - Granata Tommaso (Project Manager)
B3018674 3744 APP

CESI S.p.A.

Via Rubattino 54
I-20134 Milano - Italy
Tel: +39 02 21251
Fax: +39 02 21255440
e-mail: info@cesi.it
www.cesi.it

Capitale sociale € 8.550.000 interamente versato
C.F. e numero iscrizione Reg. Imprese di Milano 00793580150
P.I. IT00793580150
N. R.E.A. 429222

© Copyright 2013 by CESI. All rights reserved

Indice

1	SINTESI	4
2	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	5
2.1	Analisi delle condizioni idrauliche	6
2.1.1	Lago di San Cipriano.....	6
2.1.2	Lago di Allori	6
2.1.3	Lago di Castelnuovo	7
2.1.4	Caratteristiche del sistema Allori-Castelnuovo-San Cipriano	8
3	MODELLAZIONE DEL BILANCIO IDRICO.....	10
3.1	Idrologia del sito.....	10
3.1.1	Parametri meteorologici	10
3.1.2	Modellazione afflussi/deflussi	19
3.1.3	Descrizione del modello termo-idrologico utilizzato	24
3.2	Modellazione del bilancio idrico del lago di Castelnuovo	27
3.2.1	Dati di input utilizzati.....	27
3.2.2	Risultati della modellazione	27
3.3	Modellazione del bilancio idrico del lago di San Cipriano.....	31
3.3.1	Dati di input utilizzati.....	31
3.3.2	Risultati della modellazione	32
3.4	Modellazione del bilancio idrico del lago di Allori.....	37
3.4.1	Dati di input utilizzati.....	37
3.4.2	Risultati della modellazione	37
3.5	Valutazione dell'evaporazione potenziale e reale e della riserva idrica dei suoli	42
3.5.1	Evaporazione potenziale e reale.....	42
3.5.2	Riserva idrica dei suoli	43
4	VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RICAMBIO DEI TRE LAGHI.....	45
4.1.1	Valutazione del tempo di ricambio del lago di Castelnuovo	45
4.1.2	Valutazione del tempo di ricambio del lago di San Cipriano	46
4.1.3	Valutazione del tempo di ricambio del lago di Allori	48
5	MODELLAZIONE DEL BILANCIO BIOCHIMICO.....	49
5.1	Qualità delle acque superficiali dei bacini imbriferi sottesi ai laghi di Castelnuovo, Allori e San Cipriano.....	49
5.1.1	Criteri di classificazione dei corsi d'acqua.....	54
5.1.2	Caratterizzazione dei corsi d'acqua	56
5.1.3	Criteri di classificazione delle acque degli invasi	59
5.1.4	Caratterizzazione delle acque degli invasi	61
5.2	Descrizione del modello biochimico adottato per i bacini di Allori, Castelnuovo e San Cipriano	65
5.3	Modellazione del bilancio biochimico del lago di Castelnuovo.....	67
5.3.1	Dati di input utilizzati.....	67
5.3.2	Risultati della modellazione	68
5.4	Modellazione del bilancio biochimico del lago di Allori	73
5.4.1	Dati di input utilizzati.....	73
5.4.2	Risultati della modellazione	73

5.5	Modellazione del bilancio biochimico del lago di San Cipriano	78
5.5.1	Dati di input utilizzati.....	78
5.5.2	Risultati della modellazione	78
6	CONCLUSIONI.....	83
7	BIBLIOGRAFIA CITATA O CONSULTATA	86

STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
0	10/07/2013	B3018674	Prima emissione

1 SINTESI

Enel Produzione SpA, nell'ambito del progetto di recupero ambientale della miniera di S. Barbara, ha incaricato CESI SpA di eseguire l'analisi modellistica del bilancio idrico e biochimico dei laghi di Castelnuovo, Allori e San Cipriano in relazione a quanto previsto dal Decreto attuativo della Regione Toscana n.416 del 09 febbraio 2010.

L'analisi del bilancio idrico è stata eseguita modellando l'idrologia dei laghi di Castelnuovo, Allori e San Cipriano utilizzando un ampio e rappresentativo set di dati meteorologici di input (1/9/92 ÷ 31/12/10). I risultati delle modellazioni delle caratteristiche idrologiche dei tre laghi hanno permesso di valutare anche il tempo di ricambio o di permanenza di ciascun invaso.

Lo studio è poi proseguito con l'utilizzo dei risultati idrologici come input per una modellazione biochimica della qualità dell'acqua dei tre invasi, per valutare l'andamento nel tempo dei valori di parametri quali BOD₅, Fosforo totale, *Escherichia coli* ed Enterococchi intestinali.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

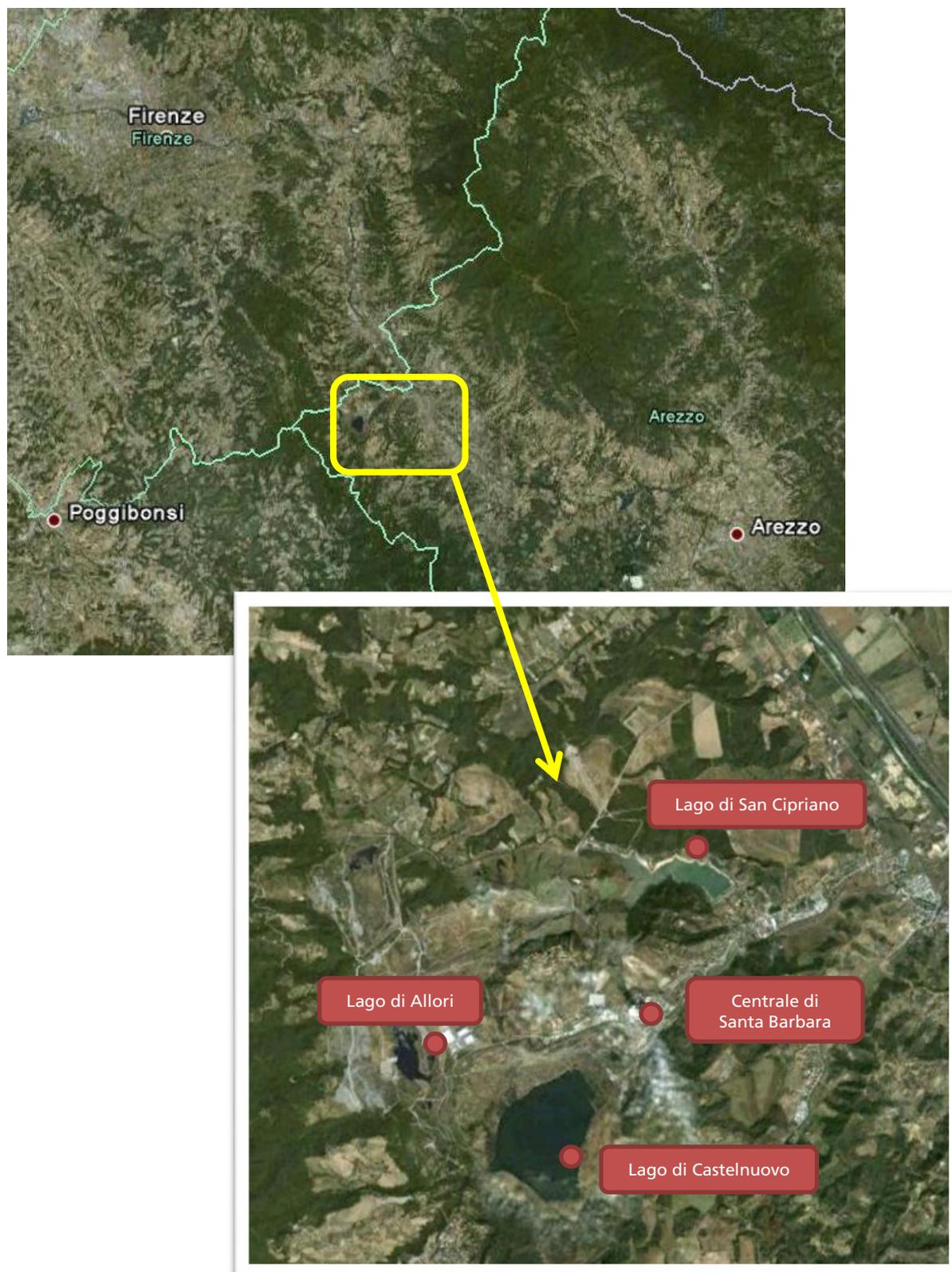


Figura 1: Inquadramento dell'area di studio. Fonte Google Earth.

2.1 Analisi delle condizioni idrauliche

Le condizioni idrauliche generali ipotizzate per questo studio si basano in parte su informazioni derivanti da studi precedenti e per quanto riguarda San Cipriano anche da dati ricavati dal FCEM (Foglio Condizioni per l'Esercizio e la Manutenzione della diga) e sono riassunte nei paragrafi seguenti:

2.1.1 Lago di San Cipriano

• fondo del lago ¹ :	143.10 m s.l.m.
• quota di massimo invaso:	153.50 m s.l.m.
• superficie alla quota di massimo invaso ² :	660 000 m ²
• volume alla quota di massimo invaso:	3 660 000 m ³
• quota di massimo utilizzo:	152.30 m s.l.m.
• superficie alla quota di massimo utilizzo ³ :	497 000 m ²
• volume alla quota di massimo utilizzo ⁴ :	2 245 273 m ³

2.1.2 Lago di Allori

• fondo del lago:	170.00 m s.l.m.
• quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta):	183.00 m s.l.m.
• superficie alla quota di massima ritenuta:	438 520 m ²
• volume alla quota di massima ritenuta:	3 315 880 m ³
• quota di massima piena ⁵ :	186.00 m s.l.m.
• superficie alla quota di massima piena:	521 960 m ²
• volume alla quota di massima piena:	4 762 260 m ³

In figura 2 viene riportato lo schema dell'idrografia e dei bacini imbriferi di Allori e San Cipriano.

¹ quota più bassa ricavata dalla batimetria effettuata dal CESI nel 2011

² dati ricavati dal FCEM di San Cipriano

³ dato ricavato dalla batimetria CESI del 2011

⁴ dato ricavato dalla batimetria CESI del 2011

⁵ per massima piena si intende un evento con tempo di ritorno pari a 1000 anni



Figura 2: Morfologia e idrografia degli invasi di Allori e San Cipriano. Fonte Google Earth.

2.1.3 Lago di Castelnuovo

• fondo del lago:	135.00 m s.l.m.
• quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta):	147.00 m s.l.m.
• superficie alla quota di massima ritenuta:	1 260 000 m ²
• volume alla quota di massima ritenuta:	12 102 000 m ³
• quota di massima piena ⁶ :	149.00 m s.l.m.
• superficie alla quota di massima piena:	1 356 500 m ²
• volume alla quota di massima piena:	14 718 500 m ³

In figura 3 viene riportato lo schema dell'idrografia e del bacino imbrifero afferente all'invaso di Castelnuovo.

⁶ per *massima piena* si intende un evento con tempo di ritorno pari a 1000 anni

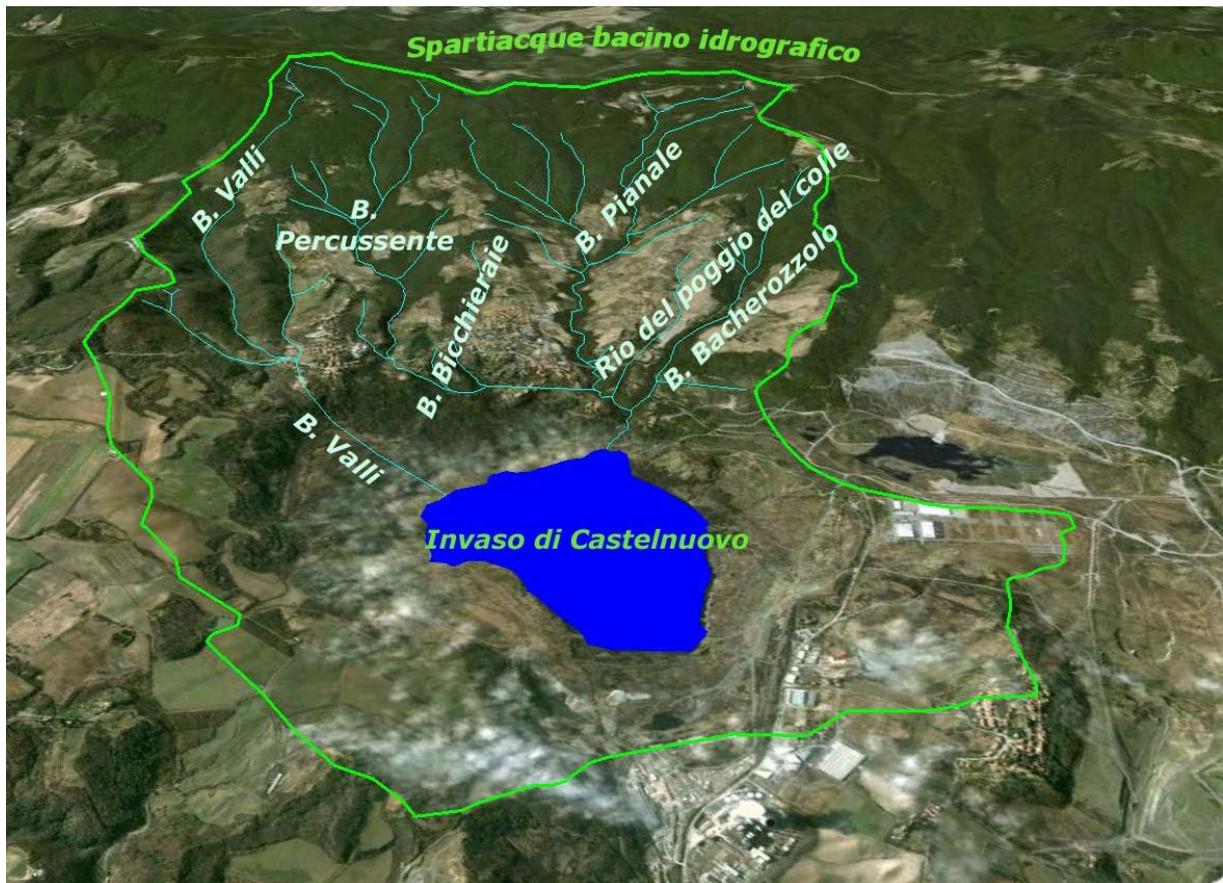


Figura 3: Morfologia e idrografia del bacino di Castelnuovo. Fonte Google Earth.

2.1.4 *Caratteristiche del sistema Allori-Castelnuovo-San Cipriano*

Le principali caratteristiche morfologiche dei bacini in esame sono state espone nei paragrafi precedenti; di seguito sono invece riassunte altre condizioni al contorno del sistema idraulico in esame, necessarie per le successive modellazioni, così come concordate con il Committente:

- ❖ trasferimento, mediante micro-centrale idroelettrica, dal lago di Allori al lago di Castelnuovo di una portata costante pari a 40 l/s con il fine di diluire le acque del lago di Castelnuovo; l'opera di derivazione è dotata di un manufatto di presa con soglia a quota 182.00 m s.l.m.;
- ❖ rilascio, dal lago di Castelnuovo, di una portata costante pari a 12 l/s nel corpo idrico ricettore;
- ❖ rilascio, dal lago di Allori, di una portata costante di 10 l/s nel corpo idrico ricettore;
- ❖ prelievo dal fiume Arno, tramite pompaggio, e immissione nell'invaso di San Cipriano di portate di reintegro per garantire la disponibilità idrica necessaria al funzionamento della centrale; i quantitativi prelevati hanno entità variabile e vengono calcolati come differenza tra i deflussi naturali in ingresso al bacino di San Cipriano e il fabbisogno idrico della centrale. Inoltre, in accordo con il relativo disciplinare di concessione, il prelievo dal

fiume Arno è interdetto dal 1° luglio al 30 settembre a tutela delle condizioni di magra estiva del fiume Arno;

- ❖ rilascio, dal bacino di San Cipriano, di un deflusso minimo vitale pari a 10 l/s nel corpo idrico ricettore;
- ❖ prelievo, dal bacino di San Cipriano, di una portata media pari a 152.78 l/s utilizzata per il funzionamento della centrale di Santa Barbara.

Lo schema idraulico dell'area oggetto di studio è mostrato in figura 4.

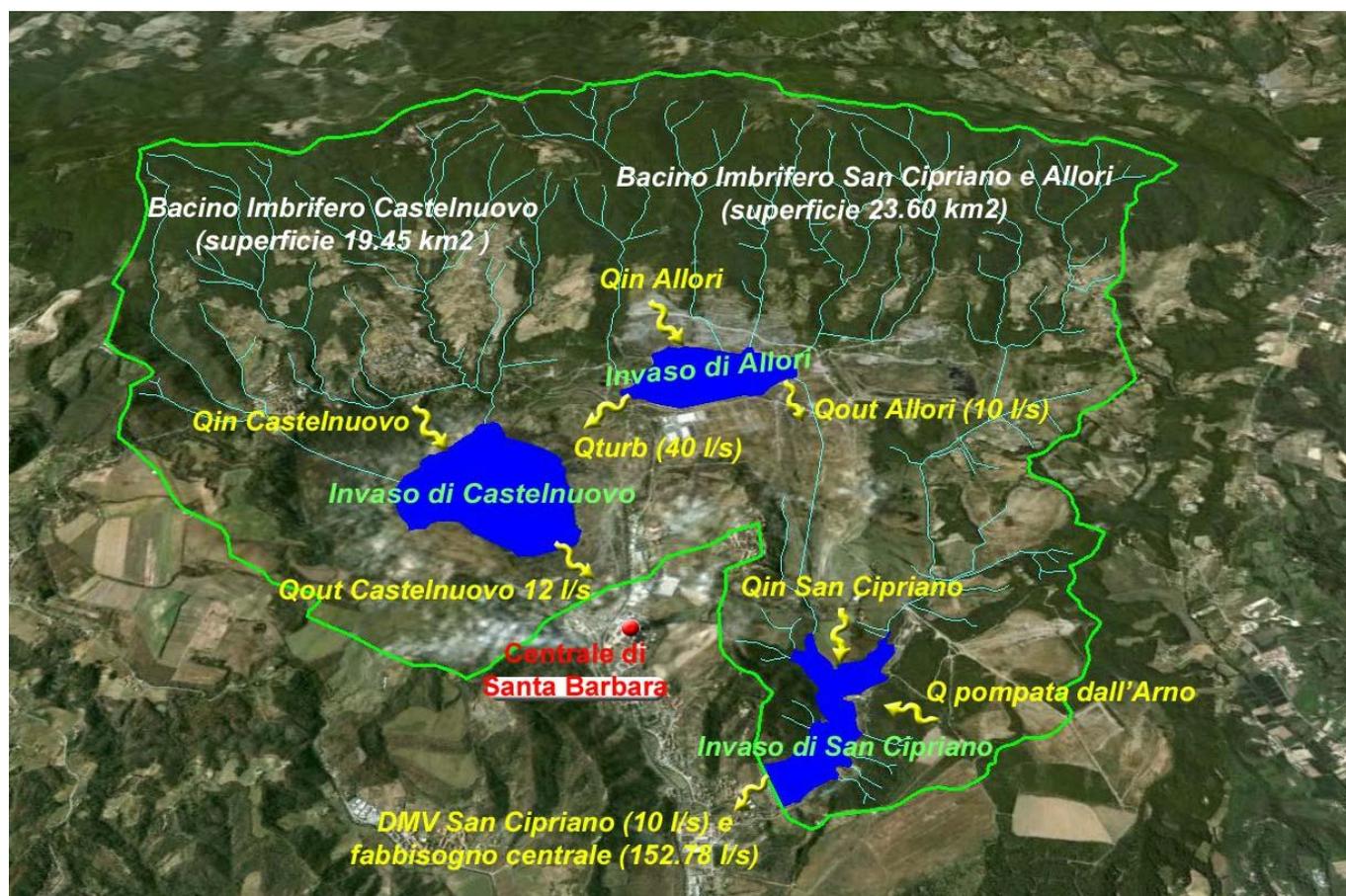


Figura 4: Schema idraulico dei tre bacini. Fonte Google Earth.

Lo schema mostrato nell'immagine precedente si basa sul nuovo assetto idrografico previsto nel progetto di sistemazione delle rete drenante esistente, ancora da realizzare al momento della stesura del presente documento.

3 MODELLAZIONE DEL BILANCIO IDRICO

L'analisi richiesta è stata eseguita modellando le condizioni idrologiche dei laghi di San Cipriano, Allori e Castelnuovo utilizzando un ampio set di dati meteorologici di input, raccolti in 18 anni di osservazioni locali.

3.1 Idrologia del sito

3.1.1 Parametri meteoclimatici

La modellazione delle condizioni idrologiche dell'area in questione è stata effettuata utilizzando un esteso (18 anni) set di dati di input (parametri meteoclimatici), per conferire un carattere di sufficiente generalità allo studio.

I dati sono relativi al periodo di tempo compreso tra il 1 settembre 1992 e il 31 dicembre 2010, intervallo temporale per il quale risultano disponibili, per il sito in questione, tutti i dati meteorologici necessari alla modellazione (temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare, velocità del vento e precipitazioni).

Come naturale per serie storiche di durata così consistente, si è reso necessario provvedere a una sistemazione dei dati, in particolare con l'integrazione di dati ricostruiti nei periodi in cui gli strumenti di misura avevano avuto dei malfunzionamenti. Sul set di dati si è intervenuto inserendo, ove necessario, i valori medi giornalieri di ciascun mese calcolati sull'intero set di dati per la specifica variabile, come esemplificato in figura 5.

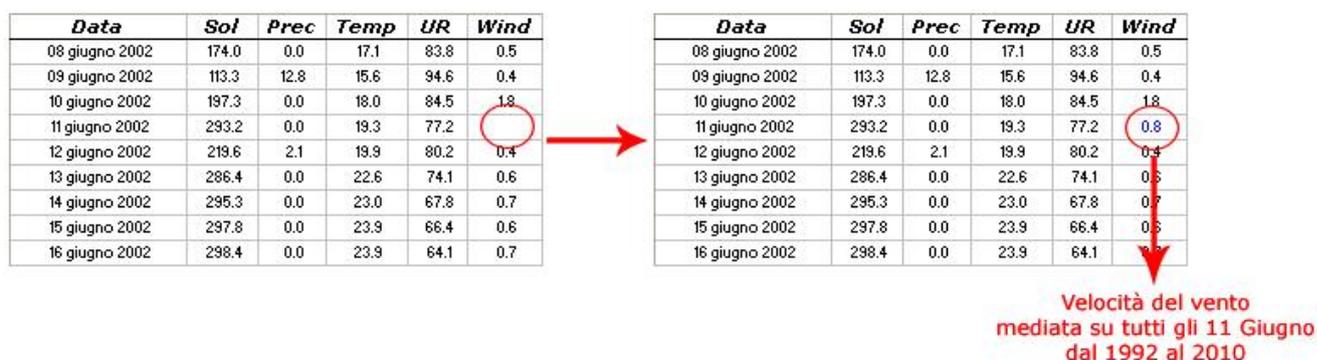


Figura 5: Processo di ricostruzione dati mancanti.

In particolare è stato ricostruito, con la medesima modalità, un lungo periodo mancante compreso tra il 1 gennaio e il 17 settembre 2006; tale operazione ha portato l'anno 2006 a essere caratterizzato quasi interamente da valori medi, privo di episodi "acuti" quali, ad esempio, intensi scrosci di pioggia (v. fig. 7, con precipitazioni medie giornaliere molto contenute per il periodo in questione).

Tale necessaria elaborazione ha comportato, nel seguito della modellazione, un comportamento a tratti anomalo per diverse variabili di output, che verrà comunque dettagliato nei paragrafi successivi.

I dati meteorologici raccolti, elaborati e utilizzati per la modellazione sono illustrati in grafico nelle figure da 6 a 10; nelle tabelle 1-5 vengono riassunti gli andamenti medi mensili.

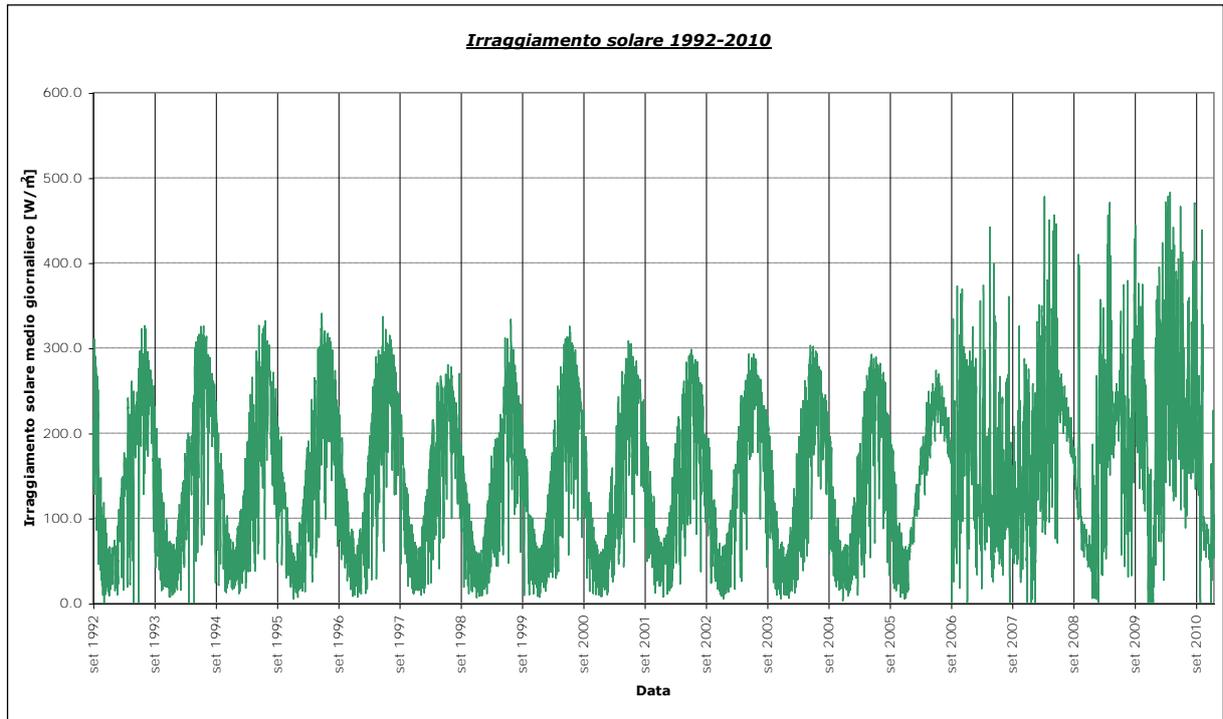


Figura 6: Irraggiamento solare.

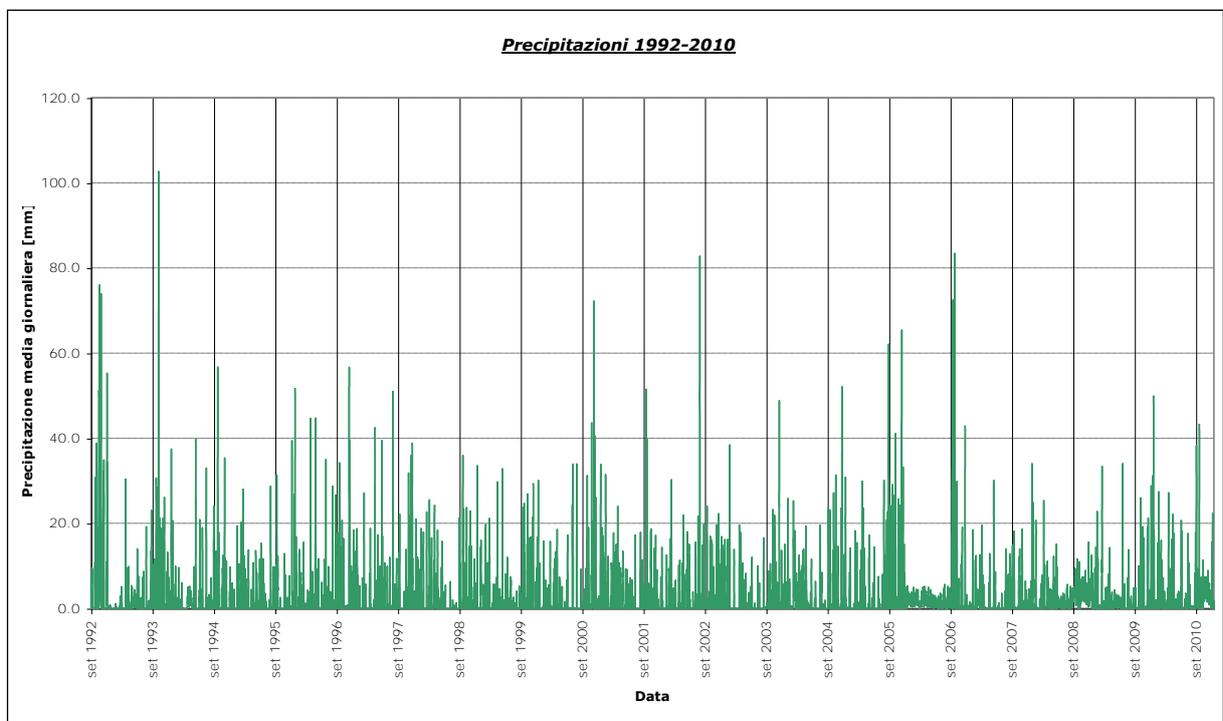


Figura 7: Precipitazioni.

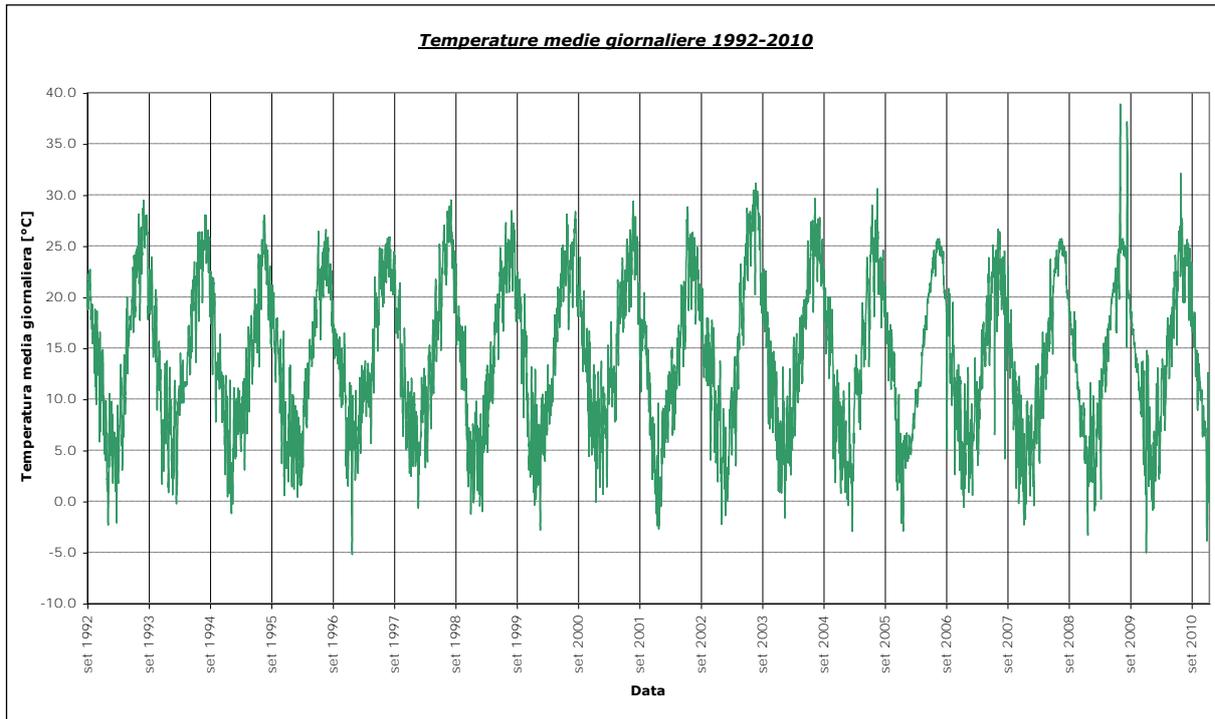


Figura 8: Temperature medie giornaliere dell'aria.

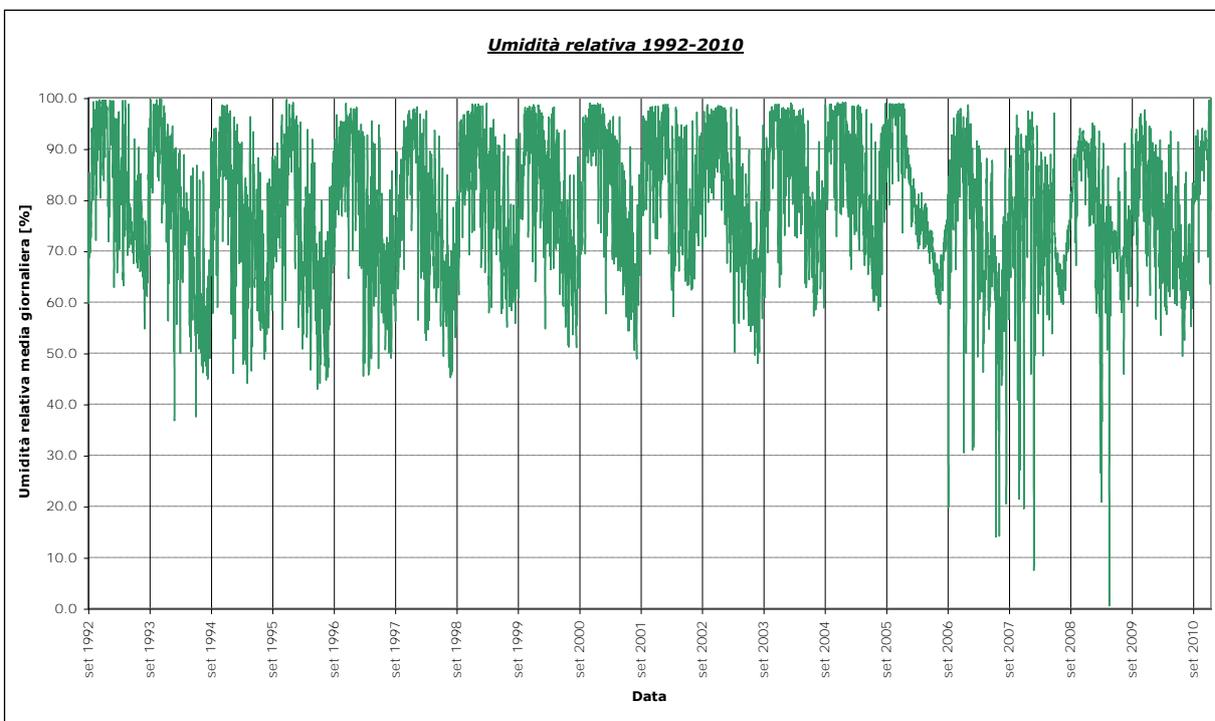


Figura 9: Umidità relativa.

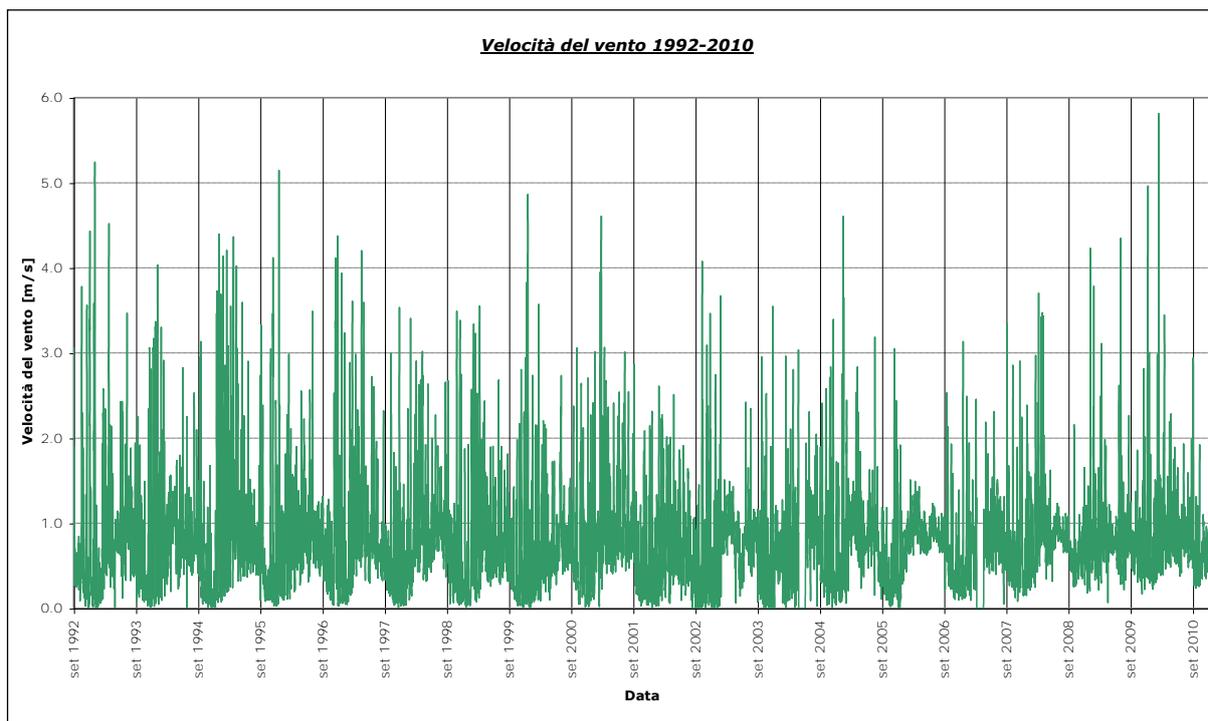


Figura 10: Velocità del vento.

Tabella 1: Irraggiamento medio.

Giorno	Irraggiamento solare medio 1992-2010 [W/m²]											
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
1	58.0	99.6	112.5	159.6	193.1	226.0	243.9	210.7	185.7	135.7	93.0	66.8
2	61.3	93.1	122.4	169.2	201.7	246.6	269.0	221.1	174.2	121.9	63.0	69.0
3	61.0	78.5	127.8	173.3	249.0	217.2	250.5	240.9	195.1	121.6	82.1	58.2
4	66.0	77.6	110.9	180.4	198.5	230.6	241.0	191.2	172.4	134.4	80.9	51.9
5	65.9	72.8	139.6	178.1	198.3	214.4	258.8	210.2	186.4	121.8	95.5	69.1
6	55.9	96.0	130.5	162.4	216.2	222.6	226.8	206.6	190.2	128.5	75.0	68.1
7	57.4	111.0	146.4	165.6	193.1	233.6	254.0	214.7	175.5	130.4	67.0	50.5
8	69.2	110.6	145.9	187.0	191.1	248.4	229.2	219.4	182.8	113.0	78.7	53.7
9	52.0	103.5	142.5	166.7	174.2	237.9	235.3	225.4	168.9	118.8	78.3	43.2
10	57.3	103.1	161.1	141.4	193.3	207.7	230.5	214.2	175.2	100.0	79.8	44.6
11	64.4	114.6	139.4	129.2	186.7	191.2	238.1	210.7	182.7	105.7	61.6	51.4
12	60.3	113.1	139.2	179.4	171.2	222.1	221.3	200.1	171.0	117.1	83.1	50.2
13	85.5	129.0	140.0	175.8	192.2	221.1	234.4	215.6	183.3	141.1	76.0	52.3
14	67.9	111.3	143.8	188.0	203.8	252.5	199.7	230.2	164.6	110.7	84.4	60.0
15	83.0	116.3	149.5	171.8	223.5	224.5	234.4	215.9	176.6	119.4	54.5	70.1
16	74.8	116.2	169.1	196.5	233.0	258.8	242.1	214.8	181.8	119.3	83.0	79.3
17	72.9	121.0	169.4	190.6	201.0	273.2	234.7	204.8	182.3	117.7	87.6	64.1
18	88.3	136.6	181.9	207.4	187.0	242.5	239.5	195.1	152.0	137.1	92.2	62.2
19	84.0	120.2	160.5	194.8	218.8	237.7	231.8	206.1	164.6	142.3	80.4	53.0
20	78.2	138.8	152.6	150.9	236.5	261.1	222.9	217.3	153.4	118.1	72.0	43.6
21	73.1	135.4	173.5	190.4	209.9	261.4	233.3	211.8	153.0	103.2	79.8	61.5
22	80.9	111.1	158.2	235.8	247.2	264.5	254.9	188.5	143.1	124.7	70.9	68.8
23	76.6	103.0	183.6	193.8	229.2	243.3	236.8	214.0	141.9	108.2	74.9	60.7
24	73.8	130.7	162.8	215.8	219.2	252.6	221.3	215.7	134.5	118.4	73.5	59.0
25	72.8	117.8	152.2	182.0	234.7	241.5	209.3	199.0	144.2	115.8	85.4	41.5
26	81.3	138.8	160.1	187.1	227.3	254.1	223.3	178.8	172.6	123.3	70.9	44.0
27	85.3	128.0	159.5	155.9	246.8	261.1	238.7	175.7	145.2	101.7	73.6	48.2
28	69.9	126.5	177.8	191.0	216.9	224.2	214.2	185.1	145.3	101.4	86.7	63.0
29	87.5	146.7	170.2	175.3	257.8	245.6	232.6	173.8	136.5	84.5	72.9	54.9
30	100.6		170.7	183.8	255.6	239.8	226.4	218.0	128.4	101.6	67.2	38.0
31	99.2		195.8		240.9		216.5	175.5		99.4		49.3
MEDIE	73.0	113.8	153.2	179.3	214.4	238.6	233.7	206.5	165.5	117.3	77.5	56.5

Tabella 2: Precipitazioni medie.

Giorno	Precipitazioni medie 1992-2010 [mm]											
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
1	5.3	0.4	2.4	2.1	0.4	3.2	0.5	0.1	1.3	4.5	2.9	2.3
2	1.2	2.4	3.5	5.0	3.9	1.8	0.1	0.1	1.7	5.3	3.0	1.0
3	1.9	4.1	2.6	1.5	3.7	2.7	2.8	1.2	2.7	4.7	3.3	4.5
4	3.1	4.9	4.4	2.0	4.9	0.0	0.1	0.5	1.6	2.9	1.7	5.6
5	3.8	3.4	1.1	3.5	2.8	2.5	2.4	3.1	1.5	6.0	2.2	5.8
6	3.4	1.6	1.8	1.7	2.7	2.2	1.0	4.8	0.2	2.6	7.2	1.3
7	2.1	1.9	1.5	2.5	1.6	2.5	0.1	0.5	1.0	7.9	5.5	2.7
8	2.9	0.9	1.1	0.3	2.6	1.5	0.6	2.9	1.6	11.3	3.7	3.0
9	2.3	2.0	0.6	2.5	1.8	1.3	0.0	1.2	4.8	1.0	2.5	4.3
10	1.1	1.8	0.4	4.2	0.5	0.3	0.8	5.6	0.7	3.2	3.4	2.2
11	1.3	0.9	1.1	4.5	2.1	2.7	2.2	3.3	0.4	1.5	4.1	0.7
12	3.1	0.9	1.8	5.1	1.7	3.0	0.9	2.3	2.8	1.1	3.3	1.3
13	1.1	0.5	1.2	1.9	1.3	0.6	0.2	0.4	3.6	0.5	3.0	3.5
14	0.8	1.4	0.0	1.7	1.2	1.0	0.7	0.1	3.6	1.0	2.5	2.1
15	0.8	2.6	0.4	0.9	0.1	1.9	3.5	0.2	2.2	4.0	7.3	2.5
16	0.7	0.9	0.7	3.4	0.3	1.3	0.3	0.0	1.6	2.3	4.8	0.5
17	3.3	0.9	0.8	2.6	2.2	1.1	0.9	0.4	2.3	5.0	5.2	0.6
18	2.5	1.6	0.4	0.7	4.3	0.4	0.6	0.8	5.0	2.6	6.6	1.6
19	3.0	3.8	0.9	2.3	0.8	2.5	0.8	0.1	2.7	2.8	1.7	1.5
20	0.5	0.9	1.8	4.1	1.9	2.1	3.4	1.5	3.6	7.0	4.8	5.1
21	1.8	4.5	1.5	2.8	3.0	1.0	0.1	2.1	4.4	10.9	4.5	4.0
22	0.9	2.1	1.4	2.2	0.3	2.0	0.6	1.0	5.1	2.8	5.9	2.7
23	3.8	4.0	1.4	2.4	0.9	1.5	0.0	1.4	4.5	3.5	2.6	4.4
24	3.3	3.7	4.0	1.5	1.3	0.6	0.2	0.1	9.4	4.5	1.6	2.8
25	2.1	1.0	3.7	1.0	1.2	0.7	1.5	2.9	5.0	1.6	1.5	4.5
26	2.9	1.2	0.4	0.6	0.4	0.2	0.0	1.1	8.8	1.5	8.9	7.0
27	1.3	0.7	2.9	2.3	1.7	1.3	1.2	1.7	8.9	1.7	3.4	3.6
28	0.4	1.8	2.8	1.0	3.2	1.3	0.4	5.2	3.9	1.1	1.8	1.9
29	1.1	1.3	2.8	3.1	1.9	0.2	1.2	0.4	0.7	4.0	5.1	2.0
30	1.6		1.7	1.6	0.5	0.8	1.7	0.1	3.2	6.8	4.2	2.5
31	0.6		1.2		0.4		0.4	2.8		4.3		5.7
MEDIE	2.1	2.0	1.7	2.4	1.8	1.5	0.9	1.5	3.3	3.9	3.9	3.0

Tabella 3: Temperatura media dell'aria.

Giorno	Temperatura dell'aria media 1992-2010 [°C]											
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
1	5.8	4.1	7.9	11.5	16.4	20.1	24.1	25.0	20.4	16.8	13.2	6.4
2	4.8	4.3	8.3	11.3	16.6	20.3	24.3	25.7	20.4	16.8	12.5	6.7
3	4.9	5.5	8.5	11.4	16.8	20.0	24.5	25.2	20.7	16.7	12.2	7.5
4	4.2	6.4	8.6	11.2	16.2	20.7	24.6	25.4	20.4	16.9	12.0	7.6
5	4.4	6.3	8.0	11.7	15.2	20.8	24.0	24.7	20.1	16.5	11.0	7.8
6	5.0	6.2	7.1	11.3	15.4	20.4	23.7	24.1	19.8	16.2	11.7	6.8
7	5.8	6.3	7.6	11.6	15.9	20.5	23.8	24.9	19.8	15.5	10.8	6.7
8	6.4	5.9	7.8	11.3	16.1	21.2	23.3	24.7	20.3	15.3	11.1	6.9
9	5.6	6.1	8.1	11.3	16.1	21.1	23.5	25.0	20.2	15.6	10.0	7.2
10	5.8	6.0	8.3	11.4	16.8	21.4	22.4	25.1	20.0	15.2	10.4	7.0
11	6.2	5.8	8.5	11.3	17.2	21.0	22.1	24.4	20.1	15.3	10.4	6.4
12	6.3	5.7	9.3	11.7	16.9	20.5	22.2	24.0	19.6	15.2	10.8	5.8
13	5.2	5.7	9.8	11.7	17.4	20.5	23.1	24.2	19.6	15.0	10.0	6.1
14	5.5	4.6	9.7	11.3	18.1	20.9	23.6	24.4	18.9	14.9	9.8	5.8
15	4.9	5.2	10.3	11.3	17.7	20.9	23.9	24.6	18.4	13.9	9.9	5.6
16	3.2	4.6	10.9	11.6	18.1	21.4	24.6	24.9	18.6	14.2	10.9	4.2
17	4.5	5.0	10.5	11.4	17.7	21.7	25.4	24.9	18.8	14.4	10.0	4.8
18	5.0	5.5	10.8	11.9	17.7	22.1	24.9	24.2	17.8	13.4	8.6	4.5
19	5.3	5.7	10.1	12.7	17.8	22.1	25.1	24.0	18.4	13.1	7.3	3.7
20	5.5	6.1	10.1	13.3	16.8	22.5	24.4	24.2	18.6	13.3	6.9	4.8
21	6.7	6.2	9.8	13.6	17.4	22.4	25.0	23.8	18.2	14.0	6.3	5.5
22	6.0	6.5	10.9	14.5	18.0	22.8	25.2	23.7	18.5	13.8	7.2	6.0
23	5.2	5.9	9.7	14.2	18.5	22.4	25.6	23.9	18.0	13.5	7.9	5.9
24	5.2	6.3	9.4	14.2	19.3	22.5	24.9	24.0	18.0	13.5	8.3	5.7
25	5.1	6.4	9.3	14.6	19.6	22.7	24.8	24.0	17.2	12.7	8.0	6.4
26	3.9	7.3	10.5	14.8	19.7	23.0	25.4	23.3	17.4	12.9	9.3	5.9
27	4.0	7.6	10.2	14.8	19.8	23.8	25.6	24.4	16.9	12.8	8.7	4.6
28	4.0	7.7	9.9	15.2	19.4	23.5	25.3	23.5	16.5	12.7	7.5	3.8
29	5.0	7.0	9.6	15.1	19.5	22.8	25.4	21.3	16.3	13.4	6.7	4.2
30	4.7		10.1	15.7	19.9	23.7	24.9	22.0	16.6	13.2	6.5	4.6
31	4.2		10.9		20.3		24.6	21.6		13.4		5.3
MEDIE	5.1	5.9	9.4	12.6	17.7	21.7	24.3	24.2	18.8	14.5	9.5	5.8

Tabella 4: Umidità relativa media.

Giorno	Umidità relativa media 1992-2010 [%]											
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
1	86.6	83.9	82.0	72.8	75.0	71.8	69.1	60.2	72.9	85.7	91.5	91.1
2	84.3	82.9	81.6	76.2	73.9	72.3	65.8	59.7	73.0	87.2	90.2	92.0
3	84.3	85.1	81.1	78.1	72.1	73.9	64.1	63.6	72.1	88.0	89.1	91.5
4	86.0	86.4	81.0	77.9	70.9	70.1	63.0	63.2	75.1	85.0	88.8	90.4
5	87.6	85.9	77.3	73.3	79.1	71.7	63.6	65.8	70.5	87.0	85.9	91.8
6	89.3	83.4	77.0	76.7	75.6	73.2	64.4	69.2	72.1	86.4	91.3	88.0
7	90.4	81.4	77.3	75.2	73.7	73.5	64.1	66.3	73.9	86.7	92.5	89.1
8	91.6	78.4	75.5	76.7	74.6	69.9	63.6	67.6	75.8	85.2	89.9	88.6
9	92.2	74.8	75.7	75.4	77.1	70.2	61.6	66.1	76.1	84.7	93.0	89.9
10	92.5	76.7	73.2	77.8	76.1	72.5	65.7	65.2	74.8	88.4	93.9	89.3
11	90.8	76.9	73.9	81.4	75.4	73.8	67.4	69.0	74.2	86.2	91.3	89.6
12	87.1	79.1	79.0	79.3	78.4	73.1	67.5	68.8	75.7	85.3	85.8	86.8
13	88.8	79.6	73.6	77.9	76.0	73.6	65.3	67.6	75.7	81.8	89.7	87.4
14	87.8	82.6	75.3	74.2	75.0	71.6	64.9	65.9	79.4	81.7	90.2	88.4
15	86.3	76.4	76.3	75.6	73.3	72.6	67.3	65.9	78.6	84.6	91.3	85.8
16	89.4	75.8	73.6	76.3	71.4	70.2	65.6	62.7	81.1	85.8	88.6	85.5
17	89.4	80.0	74.3	76.5	74.1	69.4	64.3	62.3	80.6	84.9	88.3	86.7
18	89.0	76.5	71.9	75.4	73.2	68.6	65.0	65.7	76.4	83.7	87.4	87.3
19	89.1	79.2	75.4	74.5	73.4	70.6	60.7	69.4	79.5	84.8	87.7	91.4
20	90.1	81.1	73.0	77.7	75.6	68.6	65.4	68.2	79.4	87.6	83.7	88.8
21	87.5	83.9	75.0	76.4	73.4	67.9	62.7	70.2	81.3	87.7	89.7	89.5
22	86.9	83.3	70.5	70.5	72.4	66.1	61.2	71.5	79.9	86.1	90.5	86.6
23	84.2	84.0	73.6	75.3	72.5	66.9	60.0	70.2	81.7	88.7	89.6	88.8
24	87.1	80.1	79.1	76.0	70.5	68.4	61.3	69.6	80.8	88.3	90.1	90.0
25	86.5	80.1	81.1	75.3	69.7	68.0	66.2	72.6	82.4	89.4	93.0	90.1
26	88.6	80.3	79.1	75.3	70.2	66.8	62.4	70.4	79.7	88.4	93.4	88.3
27	83.4	80.0	77.8	78.5	72.8	65.4	60.4	71.6	80.8	89.6	93.2	86.3
28	86.9	78.7	76.0	75.7	73.6	68.5	62.0	74.1	83.7	90.3	93.0	89.8
29	85.7	80.3	75.9	78.9	70.5	65.8	63.7	70.4	83.7	89.7	93.6	91.0
30	85.4		73.7	77.4	68.3	69.5	64.1	70.0	83.5	90.0	93.5	90.8
31	84.4		71.2		67.6		59.7	73.2		90.0		90.8
MEDIE	87.7	80.6	76.2	76.3	73.4	70.1	63.9	67.6	77.8	86.7	90.3	89.1

Tabella 5: Velocità media del vento.

Giorno	Velocità del vento media 1992-2010 [m/s]											
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
1	0.9	0.5	1.0	1.0	0.9	0.7	1.0	0.8	0.9	0.4	0.4	0.8
2	1.1	0.4	1.1	0.9	0.8	0.6	1.1	0.9	0.7	0.5	0.5	0.4
3	1.1	0.5	1.0	0.9	0.8	0.7	1.1	0.8	0.8	0.6	0.5	0.7
4	1.1	1.0	1.3	1.1	1.0	0.8	1.1	0.8	1.1	0.7	0.6	1.0
5	0.9	1.0	1.1	1.3	0.7	0.8	1.1	0.8	0.9	0.7	0.5	0.8
6	0.7	1.0	0.8	0.9	1.0	0.7	1.0	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6
7	0.7	0.7	1.0	1.4	0.9	0.7	1.1	0.8	0.9	0.5	0.6	0.7
8	0.4	0.7	1.2	0.8	0.8	0.7	1.2	0.9	0.9	0.6	0.8	0.7
9	0.4	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	1.1	0.8	0.7	0.5	0.4	0.5
10	0.3	1.0	1.1	1.0	0.7	0.8	0.9	0.9	0.7	0.4	0.3	0.5
11	0.8	1.0	0.7	1.2	0.7	0.8	1.2	1.1	0.8	0.4	0.6	0.6
12	0.9	0.7	0.8	1.2	0.7	0.8	0.9	1.0	0.7	0.6	0.6	0.4
13	0.5	1.1	0.9	1.1	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	0.4	0.6	0.7
14	0.6	1.0	0.8	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	1.1	0.5	0.8	0.6
15	0.7	0.8	0.6	1.0	1.0	0.8	1.0	0.8	0.9	0.4	0.7	0.8
16	0.3	1.0	1.0	1.3	0.8	0.8	0.9	0.7	0.7	0.5	1.1	0.6
17	0.4	0.6	1.1	1.1	0.7	1.0	1.2	0.7	0.8	0.8	1.0	0.4
18	0.5	0.9	1.0	1.1	1.1	0.8	1.1	0.9	0.7	0.8	1.0	0.4
19	0.7	0.9	1.3	1.4	1.0	0.7	1.0	0.7	0.8	0.5	0.7	0.3
20	0.7	0.8	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	0.7	0.6	0.5	0.9	0.6
21	0.7	0.7	1.3	1.1	0.8	1.0	0.9	0.8	0.6	0.7	0.5	0.9
22	0.6	1.0	1.3	1.1	0.8	1.0	1.0	0.7	0.4	0.8	0.8	1.0
23	0.9	0.8	0.9	0.7	0.7	1.1	1.1	0.7	0.6	0.6	0.8	1.1
24	0.8	0.9	1.1	0.7	0.6	1.0	1.1	0.7	0.5	0.8	0.6	0.9
25	0.9	0.7	1.1	1.0	0.8	0.8	1.0	0.9	0.6	0.5	0.4	0.9
26	0.9	1.5	1.1	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.8	0.4	0.6	1.1
27	0.8	1.1	1.5	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.3	0.4	1.2
28	0.5	0.8	1.1	0.8	0.9	0.8	1.0	1.1	0.5	0.3	0.6	1.0
29	0.8	0.8	1.1	0.7	1.0	0.9	0.9	1.0	0.6	0.6	0.6	0.5
30	0.7		1.2	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	0.5	0.6	0.7	0.7
31	0.8		1.2		0.9		0.9	0.9		0.6		0.8
MEDIE	0.7	0.9	1.1	1.0	0.8	0.8	1.0	0.8	0.7	0.5	0.6	0.7

3.1.2 Modellazione afflussi/deflussi

Non essendo disponibili dati sperimentali sulle portate affluenti ai bacini di Castelnuovo, Allori e San Cipriano, la loro dinamica è stata ricostruita sulla base delle precipitazioni giornaliere registrate nel periodo di riferimento dalla stazione pluviografica di Poggio al Vento, che, per ubicazione e quota, ben si presta a rappresentare le condizioni di piovosità relative ai bacini imbriferi dei tre laghi (figura 11).

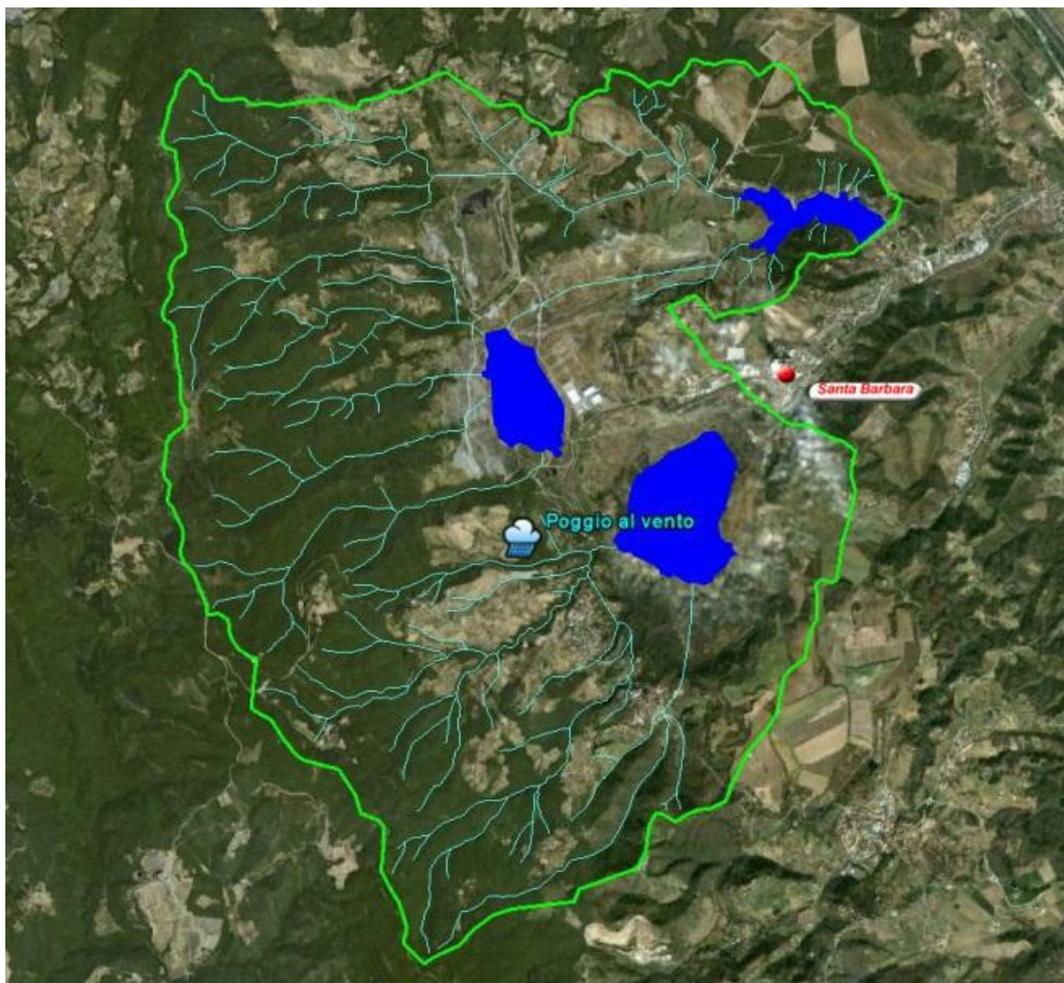


Figura 11: Ubicazione stazione pluviografica di Poggio al vento. Fonte Google Earth.

Il set di registrazioni dei totali giornalieri di pioggia è stato utilizzato come parametro fondamentale di input per il modello afflussi/deflussi, elaborato con il software HEC HMS dello U.S. Army Corps of Engineers (Figura 12).

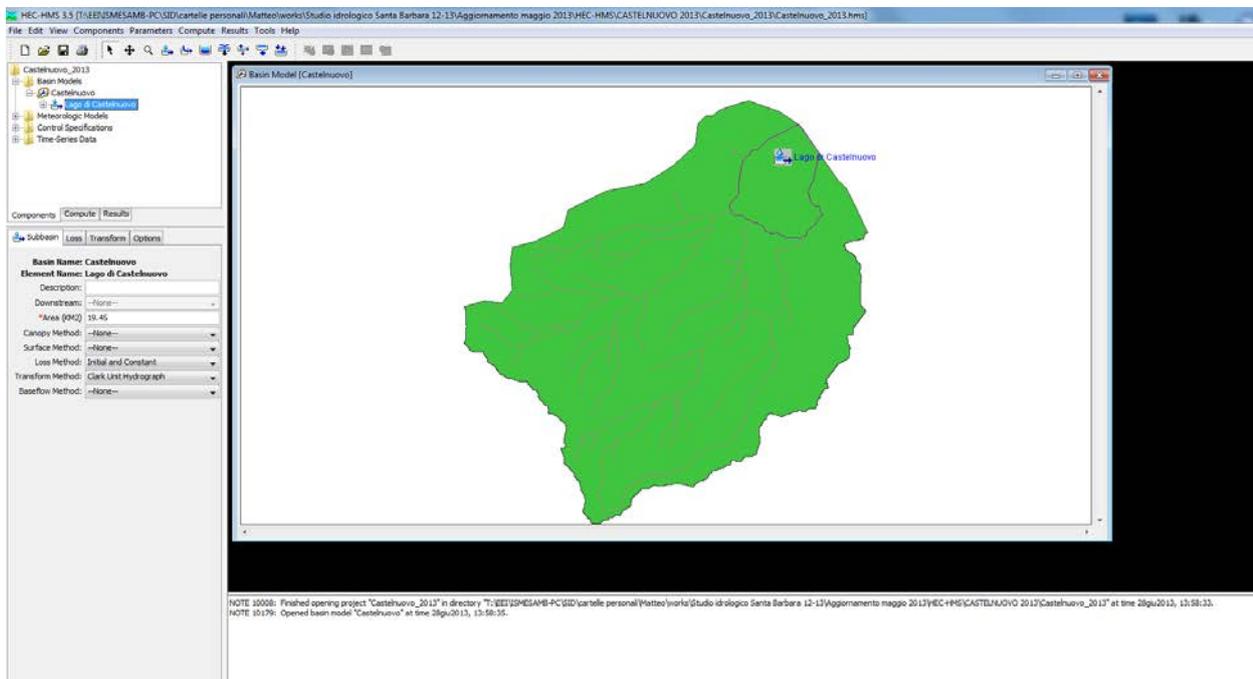


Figura 12: Esempio di schermata HEC HMS, elaborazione idrologica bacino di Castelnuovo.

Il modello, necessariamente semplificato per l'assenza di contemporanee registrazioni idrometriche e pluviometriche indispensabili per una corretta taratura di modelli più sofisticati, è stato implementato con le seguenti ipotesi di base:

- **capacità di infiltrazione costante** sul territorio del bacino e nel tempo è pari a 0.40 mm/ora; tale valore è stato selezionato al termine di una serie di *run* del modello mirate a ricostruire una dinamica di infiltrazione che simulasse un coefficiente di deflusso di 0.43, indicato anche in altri studi (Enel, 2003) come ben rappresentativo per i bacini imbriferi in esame; nel valore del coefficiente di deflusso rientra anche la stima della perdita di acqua per evaporazione reale e infiltrazione;
- **modello di trasformazione di Clark**; tale modello viene schematizzato come collegamento in serie di un serbatoio e un canale lineare con la funzione di rappresentare, rispettivamente, le dinamiche di invaso e attenuazione nel bacino imbrifero e di trasferimento delle portate liquide alla sezione di chiusura. L'applicazione dell'idrogramma unitario istantaneo di Clark richiede la conoscenza dei parametri t_c (tempo di corrvazione) e k (costante di invaso), per i quali si è fatto riferimento a dati geometrici del bacino indicati in altri studi (Enel, 2003);
- **assenza di *baseflow***⁷; tale ipotesi è giustificata, come già specificato, dalla mancanza di dati idrometrici che permettano una calibrazione del modello tale da poter chiaramente discernere le entità dei deflussi superficiali da quelli profondi.

⁷ per *baseflow* si intende la somma del flusso ipodermico d'acqua che si ha tra la superficie e la zona satura (falda) e del deflusso sotterraneo.

Le condizioni sopra riportate hanno consentito di ricostruire le singole risposte dei tre bacini agli eventi meteorici registrati nel periodo 1992-2010 e di definire l'andamento nel tempo delle portate affluenti ai bacini.

Nelle figure 13,14 e 15 vengono presentati tali andamenti per gli invasi di Castelnuovo, Allori e di San Cipriano; nelle figure 16,17 e 18 si riportano esempi più dettagliati di risposta idrologica rispettivamente per i tre bacini.

Portate in ingresso al bacino di Castelnuovo 1992-2010

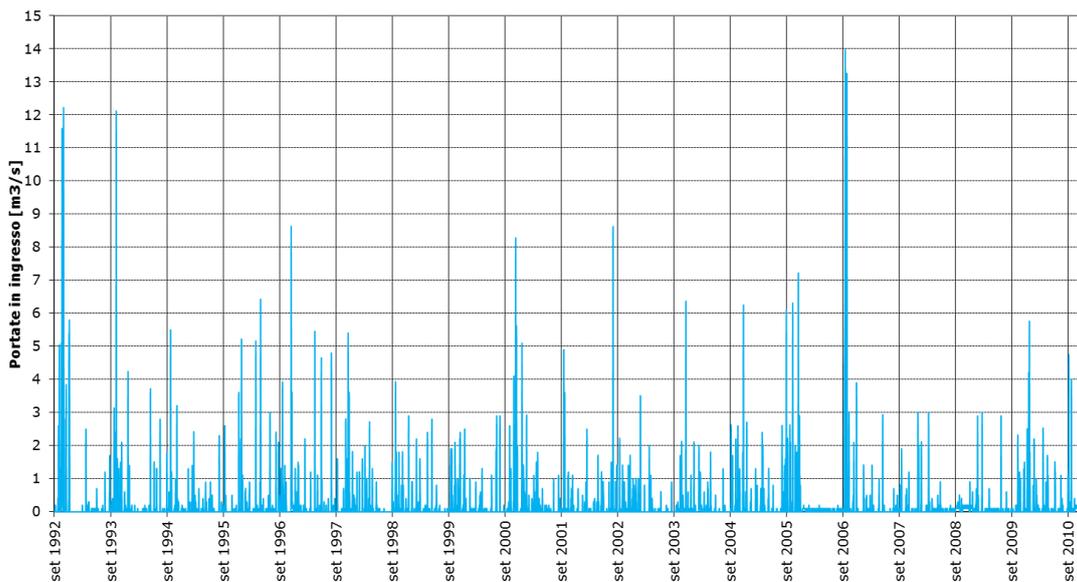


Figura 13: Portate naturali in ingresso al bacino di Castelnuovo.

Portate in ingresso al bacino di Allori 1992-2010

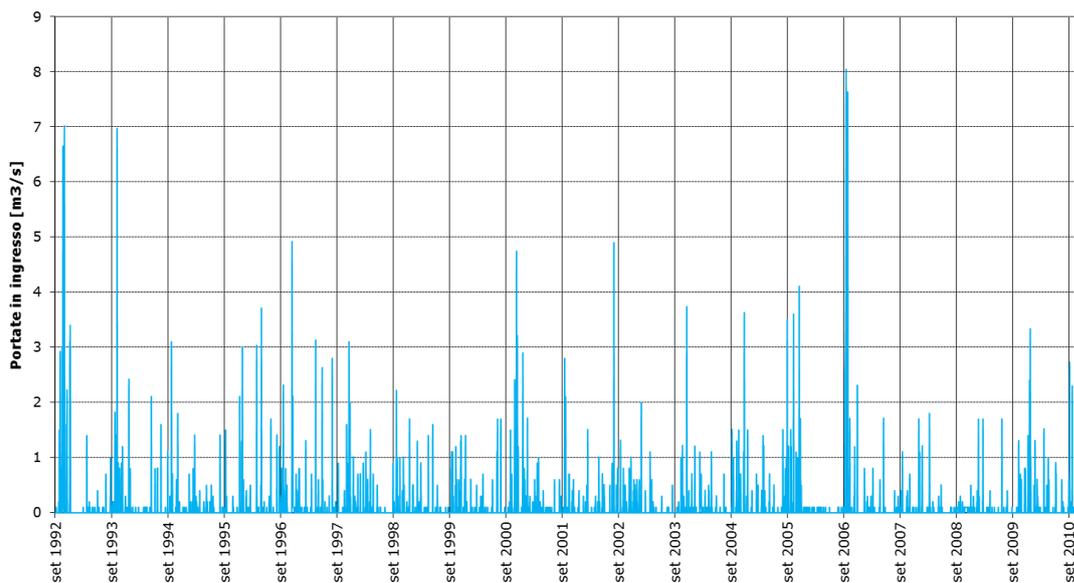


Figura 14: Portate naturali in ingresso al bacino di Allori.

Portate in ingresso al bacino di San Cipriano 1992-2010

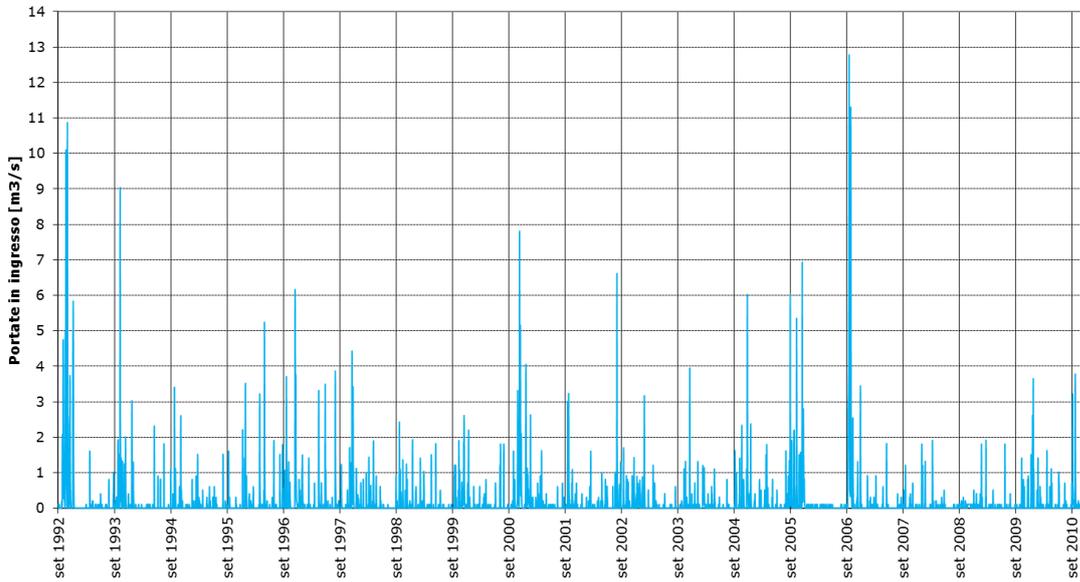


Figura 15: Portate naturali in ingresso al bacino di San Cipriano.

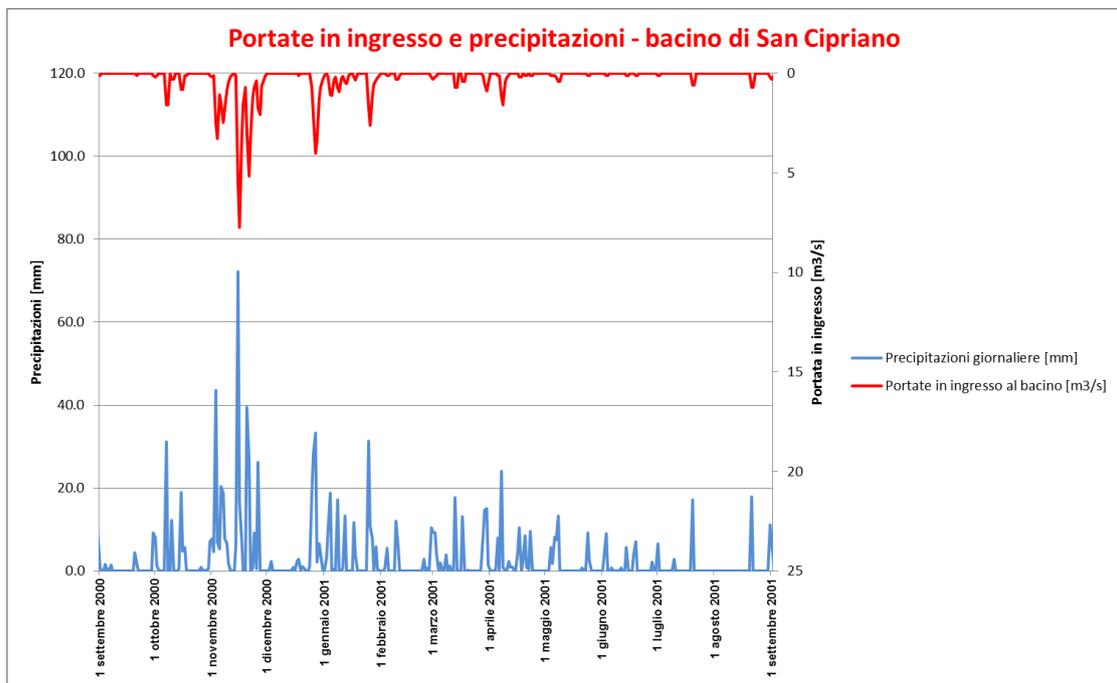


Figura 16: Dettaglio tra l'1 settembre 2000 e l'1 settembre 2001 delle precipitazioni e le portate naturali in arrivo al bacino di San Cipriano.

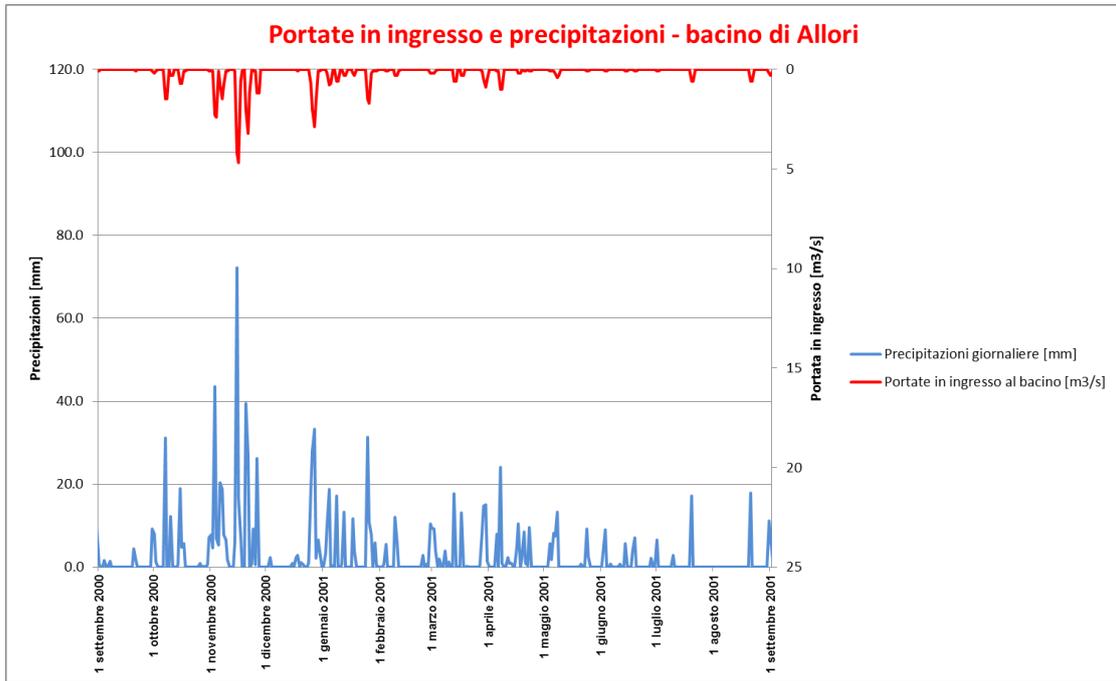


Figura 17: Dettaglio tra l'1 settembre 2000 e l'1 settembre 2001 delle precipitazioni e le portate naturali in arrivo al bacino di Allori.

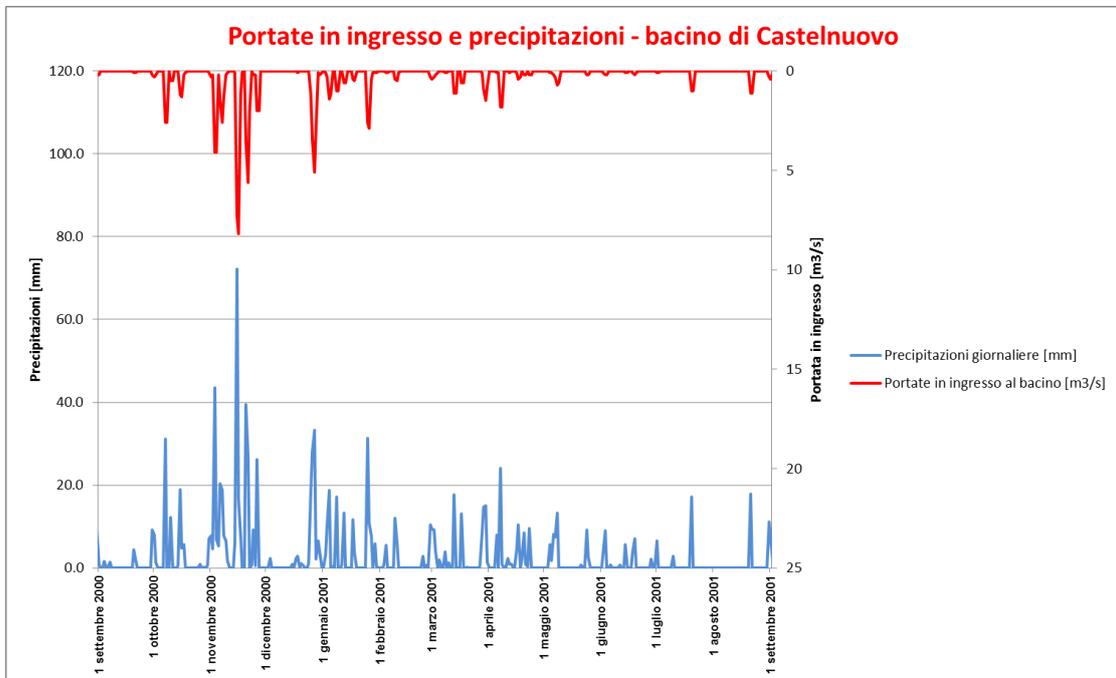


Figura 18: Dettaglio tra l'1 settembre 2000 e l'1 settembre 2001 delle precipitazioni e le portate naturali in arrivo al bacino di Castelnuovo.

3.1.3 *Descrizione del modello termo-idrologico utilizzato*

Il modello utilizzato per la ricostruzione di andamenti temporali della temperatura dell'acqua e bilancio idrico si basa sulle equazioni di bilancio di massa e di bilancio energetico applicate all'invaso in esame e simula il comportamento termo-idrologico di un generico bacino idrico del quale siano note le caratteristiche geometriche, le portate degli immissari ed emissari e i principali parametri meteorologici influenzanti.

Il modello è di tipo zero-dimensionale, cioè si basa sull'ipotesi che il lago risulti completamente rimescolato e le variabili modellate siano uniformi su tutto il volume.

L'equazione di bilancio di massa è la seguente:

$$\boxed{dV/dt = Q_{in} - Q_{out} - Q_{Evap}} \quad (1)$$

dove:

- V volume di acqua invasata nel lago;
- Q_{in} e Q_{out} portate liquide in ingresso e in uscita dal lago (nel caso comprendenti non solo quelle degli immissari e degli emissari ma anche le portate turbinate dal lago di Allori verso il lago di Castelnuovo, i deflussi minimi vitali rilasciati a valle dei tre laghi, la portata in arrivo dall'Arno e la portata destinata al funzionamento della centrale di Santa Barbara);
- Q_{Evap} flusso evaporativo netto (tolte le precipitazioni) dalla superficie verso l'atmosfera.

L'equazione base di bilancio termico utilizzata dal modello è la seguente:

$$\boxed{\rho C_w dT/dt = \varphi_{netto} A + \rho C_w Q_{imm} (T_{imm} - T_w) / V} \quad (2)$$

dove i diversi termini che compaiono hanno il seguente significato:

- ρ densità del liquido
- C_w calore specifico del liquido
- T temperatura dell'acqua del bacino lacustre
- Q_{imm} e T_{imm} portata e temperatura dell'immissario
- φ_{netto} flusso termico netto da o verso l'atmosfera
- A superficie del bacino.

Il **flusso termico netto** è rappresentato dalla seguente equazione:

$$\boxed{\varphi_{netto} = \varphi_{sol} + \varphi_{LW} + \varphi_{irr} + \varphi_s + \varphi_l}$$

dove:

φ_{sol} flusso dall'atmosfera verso la terra (ricavato dalle registrazioni dei parametri meteo)

φ_{LW} flusso radiativo di onda lunga = $-5.18 \cdot 10^{-13} \cdot (1+0.17 \cdot C^2) \cdot (273+T)^6$
 in cui C copertura nuvolosa [%]

T temperatura dell'aria [°C]

φ_{irr} flusso riflesso dalla superficie dell'acqua = $5.23 \cdot 10^{-8} \cdot (273+T_w)^4$

φ_s flusso di trasferimento del calore sensibile = $C_s \cdot \rho_a \cdot C_p \cdot U \cdot (T_w - T)$
in cui

C_s coefficiente = $1.45 \cdot 10^{-3}$

ρ_a densità dell'aria = $1.2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

C_p calore specifico dell'aria [$\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$]

U velocità del vento [m/s]

φ_L flusso di calore perso per evaporazione = $C_L \cdot \rho_a \cdot L_w \cdot U \cdot (Q_0 - Q)$
in cui

Q_0 umidità specifica di saturazione [$\text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}+\text{aria}}$]

L_w calore latente di evaporazione = $2.4 \cdot 10^6 \text{ [J/kg]}$

C_L coefficiente = $1.45 \cdot 10^{-3}$

Le equazioni sopra riportate sono dedotte da letteratura (FISCHER, 1979) così come tutti i parametri e i coefficienti utilizzati (FISCHER, 1979).

Per il calcolo dell'**umidità specifica** in condizioni di saturazione si ricorre alla formulazione:

$$Q_0 = 622 \cdot E / (P - 0.378 E)$$

dove:

E tensione di vapore saturo alla temperatura t dell'aria [mbar]

P pressione atmosferica [mbar]

Infine, la valutazione delle portate evaporate dagli specchi idrici procede attraverso il calcolo delle **tensioni di vapore** mediante la formula di Osborne e Meyers (Eisenberg-Kauzmann, 1969):

$$\log_{10} P = A + \frac{B}{T} + \frac{C_x}{T} (10^{Dx^2} - 1) + E 10^{Fy^{1.25}}$$

in cui appaiono i seguenti coefficienti:

P(t) tensione di vapore a t °C [atm]

T temperatura [°K]

A coefficiente = 5.4266514

B coefficiente = - 2005.1

C coefficiente = $1.3869 \cdot 10^{-4}$

D coefficiente = $1.1965 \cdot 10^{-11}$

E coefficiente = - 0.0044

F coefficiente = - 0.0057148

x coefficiente = $T^2 - K$
 K coefficiente = 293700.1
 y coefficiente = 374.11 - t

Le equazioni differenziali (1) e (2) vengono risolte nel modello per integrazione con il metodo di Runge-Kutta.

Tale metodo fornisce, attraverso successive integrazioni con passo temporale di un giorno, i valori medi giornalieri delle variabili oggetto della modellazione.

I dati di input per il modello sono le grandezze significative per il bilancio energetico e idrologico, e precisamente:

INPUT temperatura dell'aria
 INPUT umidità relativa
 INPUT radiazione solare
 INPUT velocità del vento
 INPUT portata e temperatura dell'immissario
 INPUT precipitazioni
 INPUT geometria dell'invaso
 INPUT condizioni iniziali dei parametri

Come indicato in precedenza, non essendo disponibili dati sperimentali sulle portate affluenti ai tre bacini, l'andamento dei deflussi in ingresso è stato ricostruito sulla base delle precipitazioni giornaliere sui relativi bacini imbriferi.

Inoltre, non avendo a disposizione misure di temperatura dell'acqua dell'immissario, questa è stata ricavata ponendola pari alla temperatura di bulbo bagnato, calcolata con i parametri meteorologici disponibili.

Infine, ai fini del corretto funzionamento del codice di calcolo, è stata garantita una soglia minima di portata costante in ingresso ai bacini pari a 1 l/s.

L'output della modellazione è costituito dagli andamenti temporali delle seguenti grandezze:

OUTPUT temperatura dell'acqua
 OUTPUT portata dell'emissario
 OUTPUT portata evaporata
 OUTPUT livello medio
 OUTPUT superficie
 OUTPUT volume

3.2 Modellazione del bilancio idrico del lago di Castelnuovo

3.2.1 *Dati di input utilizzati*

Come già specificato, le caratteristiche geometriche principali del lago di Castelnuovo utilizzate per la modellazione sono le seguenti:

- fondo del lago: 135.00 m s.l.m.
- quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta): 147.00 m s.l.m.
- superficie alla quota di massima ritenuta: 1 260 000 m²
- volume alla quota di massima ritenuta: 12 102 000 m³
- superficie bacino imbrifero: 19.45 km²

Sono state inoltre ipotizzate le seguenti ulteriori condizioni al contorno:

- immissione, dal lago di Allori, di una portata pari a 40 l/s per migliorare la diluizione delle acque del lago di Castelnuovo, tramite un'opera di derivazione con soglia dell'opera di presa a quota 182.00 m s.l.m.;
- rilascio di una portata pari a 12 l/s tramite un'opera di derivazione con soglia di presa a quota 146.15 m s.l.m.;
- Il valore del coefficiente di deflusso utilizzato nella modellazione tiene conto anche della stima delle perdite di infiltrazione e evaporazione reale del bacino imbrifero.

L'applicazione del modello termo-idrologico è stata effettuata per il lago di Castelnuovo utilizzando come dati di input le grandezze meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare, precipitazioni e velocità del vento) presentate al paragrafo 3.1.1.

La modellazione matematica è stata effettuata con passo giornaliero, per l'intero periodo di disponibilità dei dati, dal 1 settembre 1992 al 31 dicembre 2010.

3.2.2 *Risultati della modellazione*

Le simulazioni effettuate con il modello matematico termo-idrologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Castelnuovo sotto il profilo delle variazioni di temperatura, dell'evaporazione e dell'evoluzione dei livelli nelle condizioni ipotizzate.

La **temperatura dell'acqua** del bacino, concordemente con le aspettative, segue il ciclo stagionale, oscillando tra un minimo di circa 2°C in condizioni invernali e un massimo di circa 30.5°C in condizioni estive (fig.19).

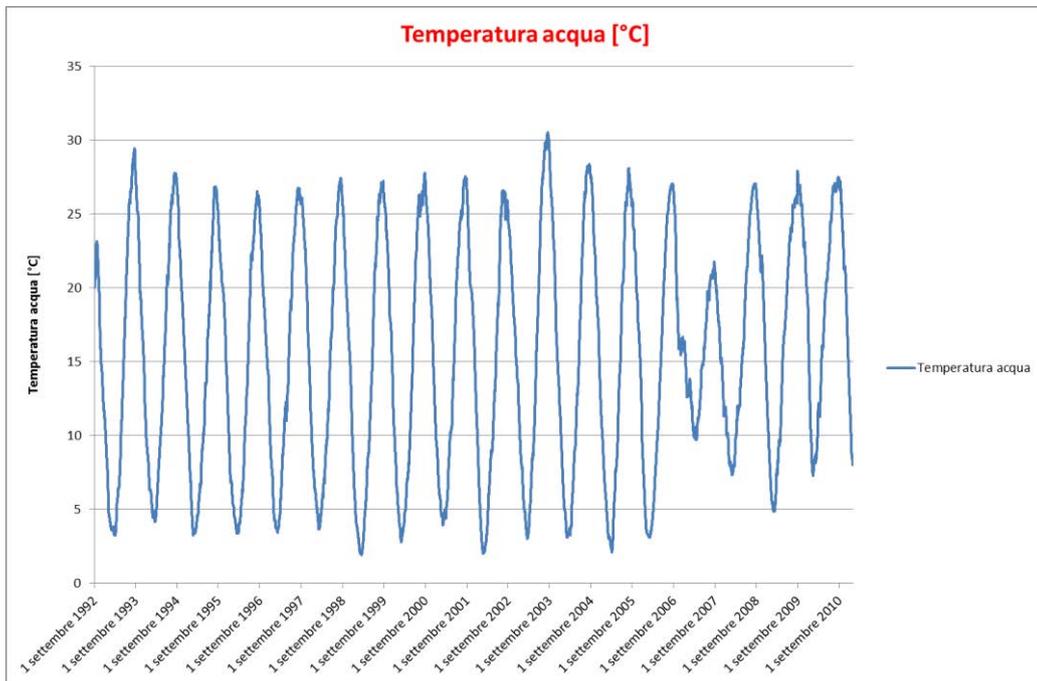


Figura 19: Temperatura dell'acqua nel bacino di Castelnuovo.

Nel corso dell'intero periodo analizzato (settembre 1992 - dicembre 2010) i valori di **evaporazione netta** modellata oscillano tra 0 m³/d nelle condizioni evaporative minime e circa 8200 m³/d nel periodo di massima evaporazione (fig.20).

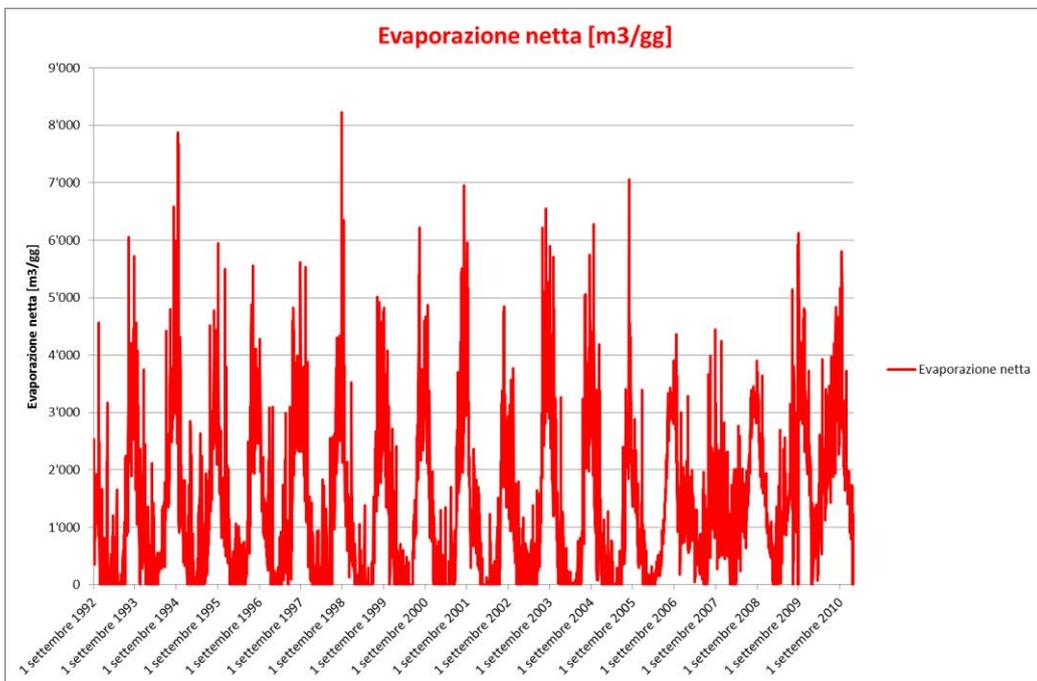


Figura 20: Evaporazione netta dallo specchio d'acqua di Castelnuovo [m³/gg].

L'andamento temporale dei **livelli del lago** (fig. 21) oscilla tra quota 146.982 e quota 147.440 m s.l.m., con un'escursione massima di circa 0.46 m.

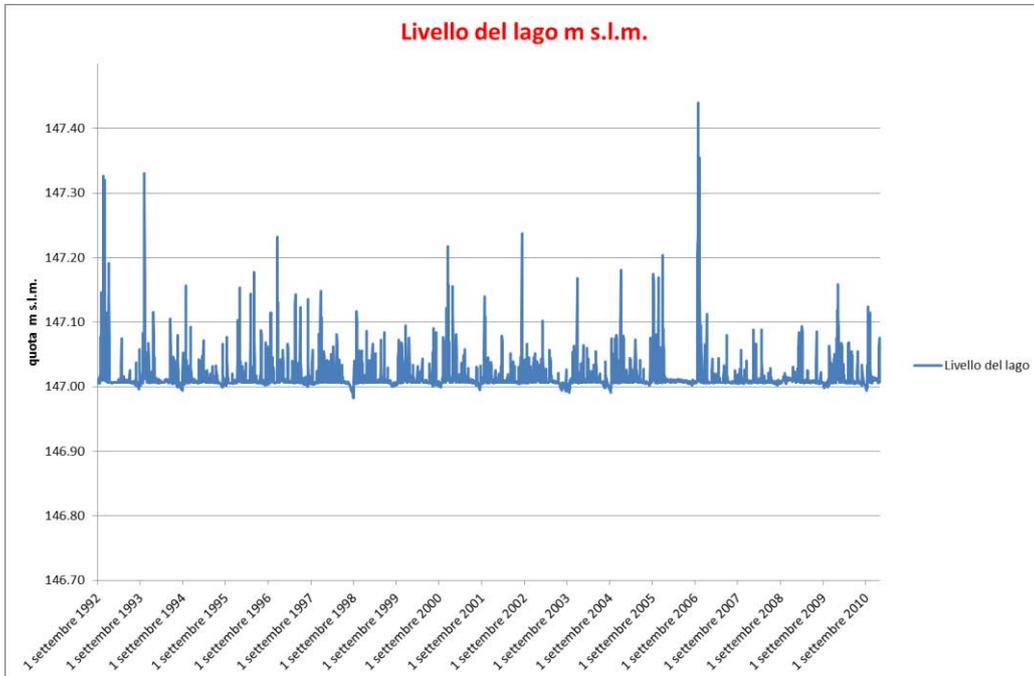


Figura 21: Lago di Castelnuovo; livello di invaso 1992-2010 m s.l.m..

Portate in ingresso - Lago di Castelnuovo

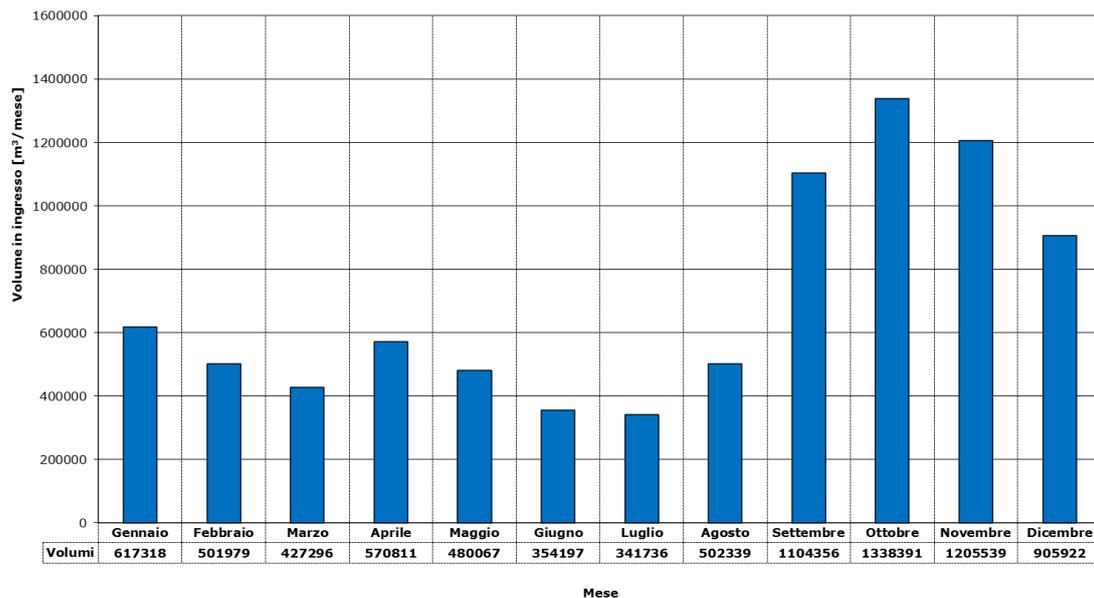


Figura 22: Lago di Castelnuovo; portate in ingresso medie mensili 1992-2010.

Evaporazione - Lago di Castelnuovo

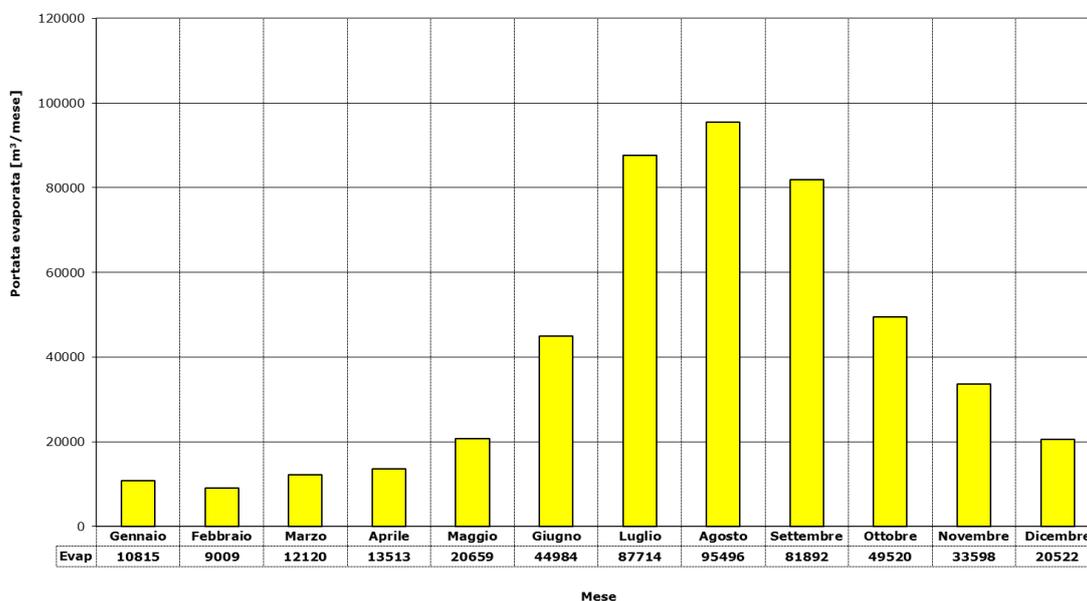


Figura 23: Lago di Castelnuovo; evaporazione media mensile 1992-2010.

Portate in uscita - Lago di Castelnuovo

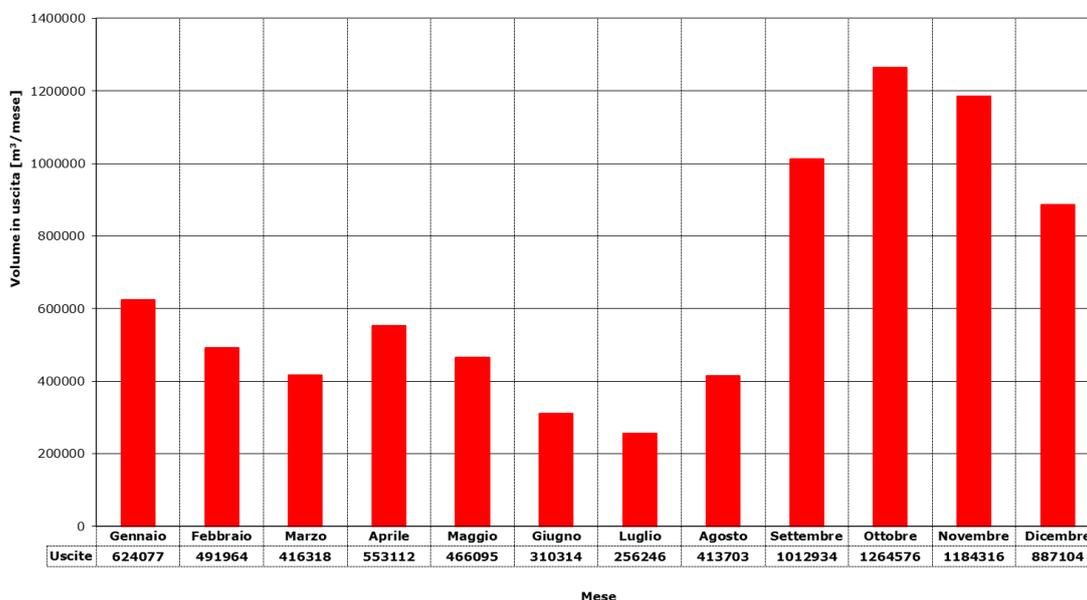


Figura 24: Lago di Castelnuovo; portate in uscita medie mensili 1992-2010.

Deficit e Surplus - Lago di Castelnuovo

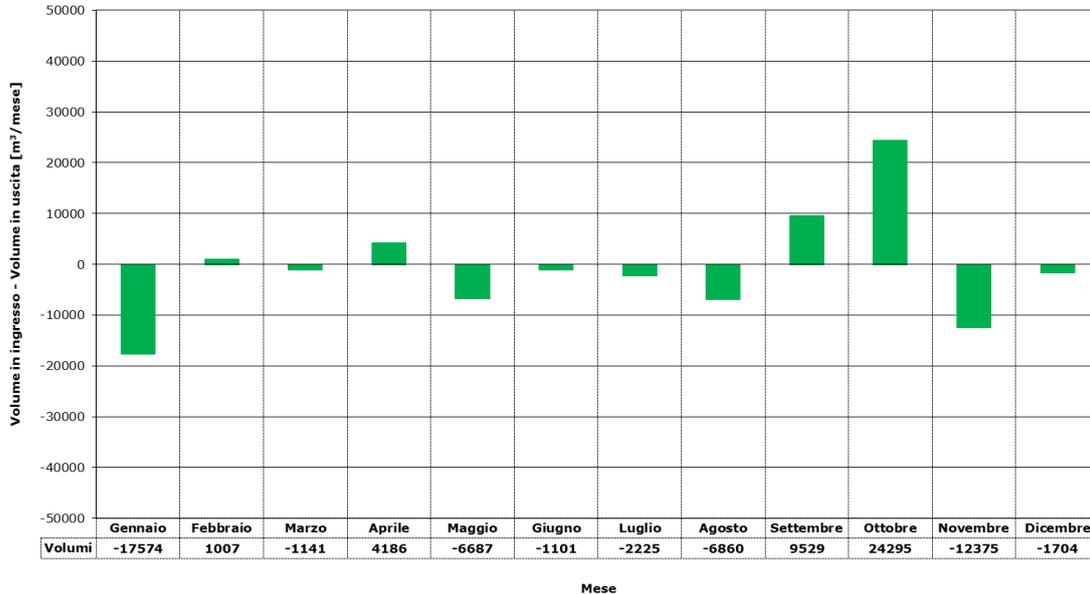


Figura 25: Lago di Castelnuovo; deficit e surplus medi mensili 1992-2010.

E' da notare che, nelle condizioni di modellazione ipotizzate, il lago di Castelnuovo ha limitate possibilità di diminuire il livello d'invaso, dal momento che riceve in ingresso dal lago di Allori una portata di turbinaggio pari a 40 l/s superiore al rilascio di 12 l/s.

3.3 Modellazione del bilancio idrico del lago di San Cipriano

3.3.1 *Dati di input utilizzati*

Come già specificato, le caratteristiche geometriche principali del lago di San Cipriano utilizzate per la modellazione sono le seguenti:

- fondo del lago: 143.10 m s.l.m.
- quota alla massima regolazione 152.30 m s.l.m.
- superficie alla quota di massimo utilizzo : 497 000 m²
- volume alla quota di massimo utilizzo: 2 245 273 m³
- superficie bacino imbrifero: 23.60 km²

Sono state inoltre ipotizzate le seguenti ulteriori condizioni al contorno:

- rilascio di una portata pari a 10 l/s per l'alimentazione del borro San Cipriano e rilascio di una portata pari a 152.78 l/s per il fabbisogno della centrale;
- portata integrativa autorizzata da disciplinare in arrivo dall'Arno per garantire i volumi necessari al funzionamento della centrale. Il pompaggio è interdetto tra il 1 luglio e il 30 settembre;

- Il valore del coefficiente di deflusso utilizzato nella modellazione tiene conto anche della stima delle perdite di infiltrazione e evaporazione reale del bacino imbrifero.

L'applicazione del modello termo-idrologico è stata effettuata per il lago di San Cipriano utilizzando come dati di input le grandezze meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare e velocità del vento) e le precipitazioni trasformate presentate al paragrafo 3.1.1.

La modellazione matematica è stata effettuata con passo giornaliero, per l'intero periodo di disponibilità dei dati, dal 1 settembre 1992 al 31 dicembre 2010.

3.3.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico termo-idrologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di San Cipriano sotto il profilo delle variazioni di temperatura, dell'evaporazione e dell'evoluzione dei livelli nelle condizioni ipotizzate.

La **temperatura dell'acqua** del bacino, concordemente con le aspettative, segue il ciclo stagionale, oscillando tra un minimo di circa 0.5°C in condizioni invernali e un massimo di circa 31°C in condizioni estive (fig. 26).

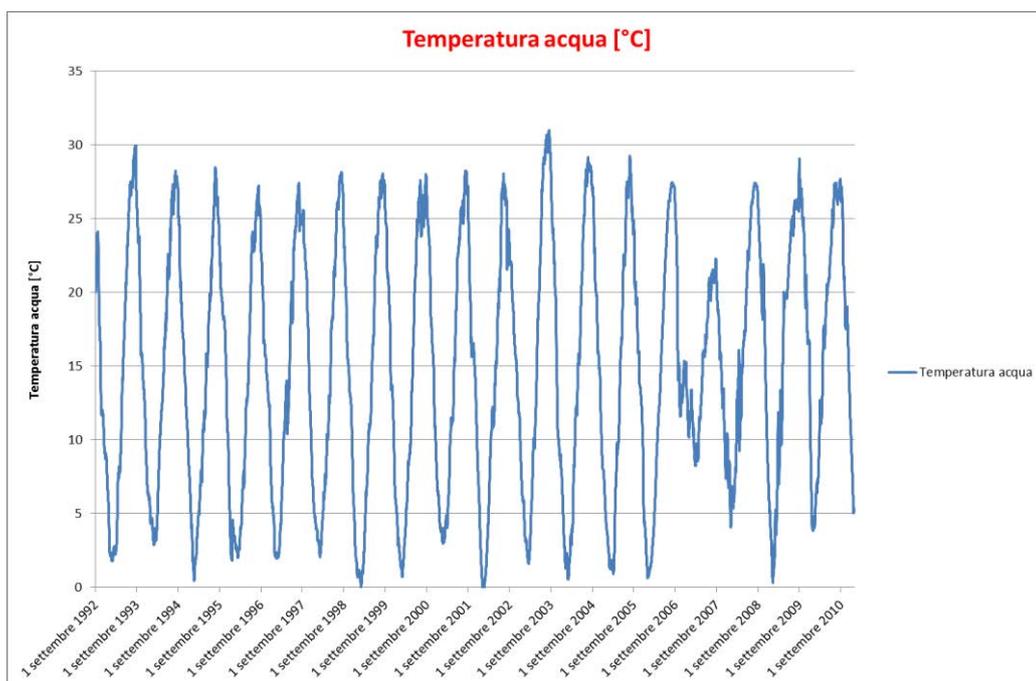


Figura 26: Temperatura dell'acqua nel bacino di San Cipriano.

Nel corso dell'intero periodo (settembre 1992 - dicembre 2010) analizzato i valori medi mensili di **evaporazione netta** oscillano tra 0 m³/gg nelle condizioni evaporative minime (in genere nel periodo invernale) e circa 3300 m³/gg nel periodo di massima evaporazione (fig. 27).

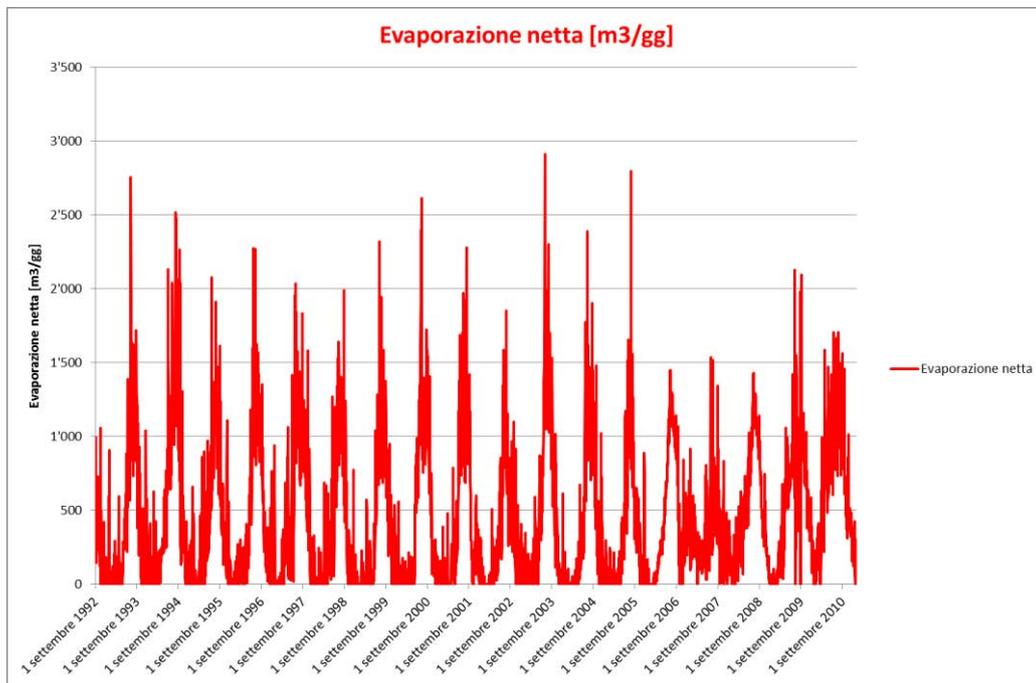


Figura 27: Evaporazione netta dallo specchio d'acqua di San Cipriano [m³/gg].

L'andamento temporale dei **livelli del lago** (fig. 28) oscilla tra circa quota 153.00 e quota 147.18 m s.l.m., con un'escursione massima di 5.82 m.

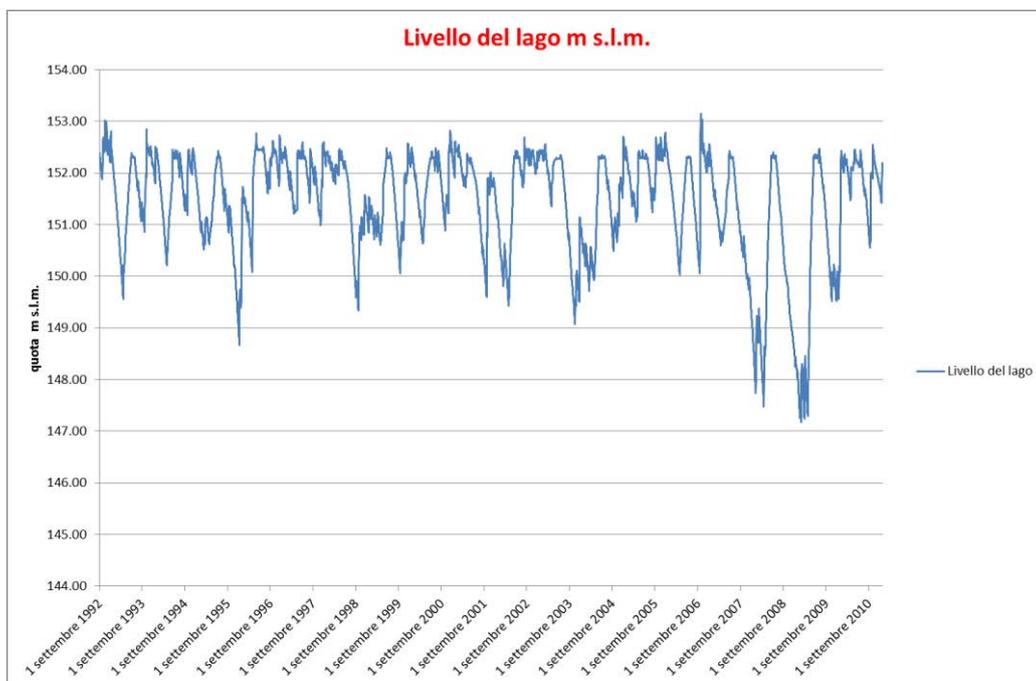


Figura 28: Lago di San Cipriano; livello di invaso 1992-2010 m s.l.m..

Portate in ingresso - Lago di San Cipriano

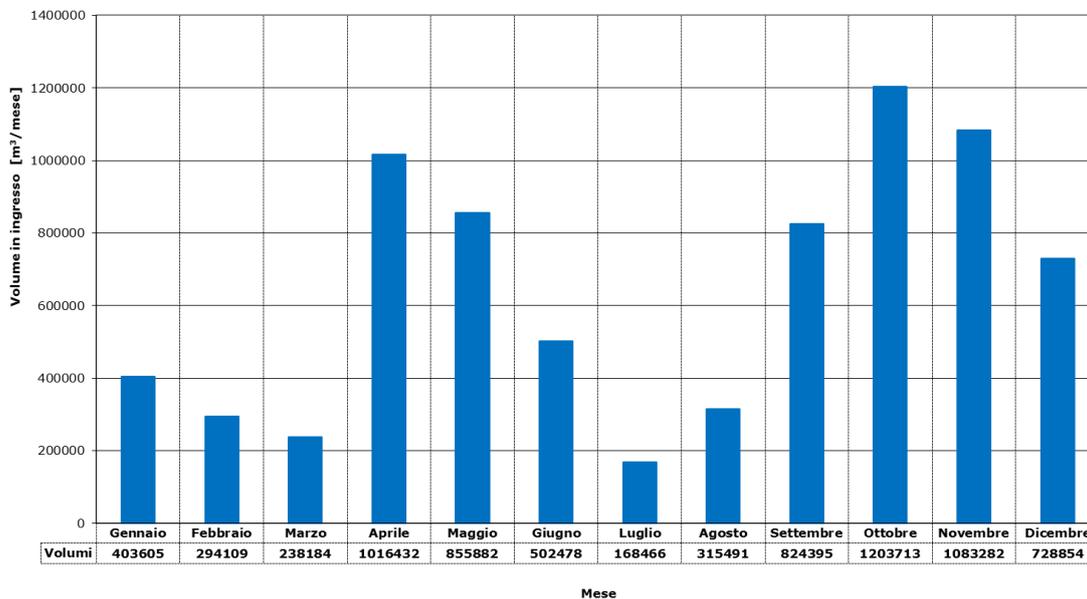


Figura 29: Lago di San Cipriano; portate in ingresso medie mensili 1992-2010.

Evaporazione - Lago di San Cipriano

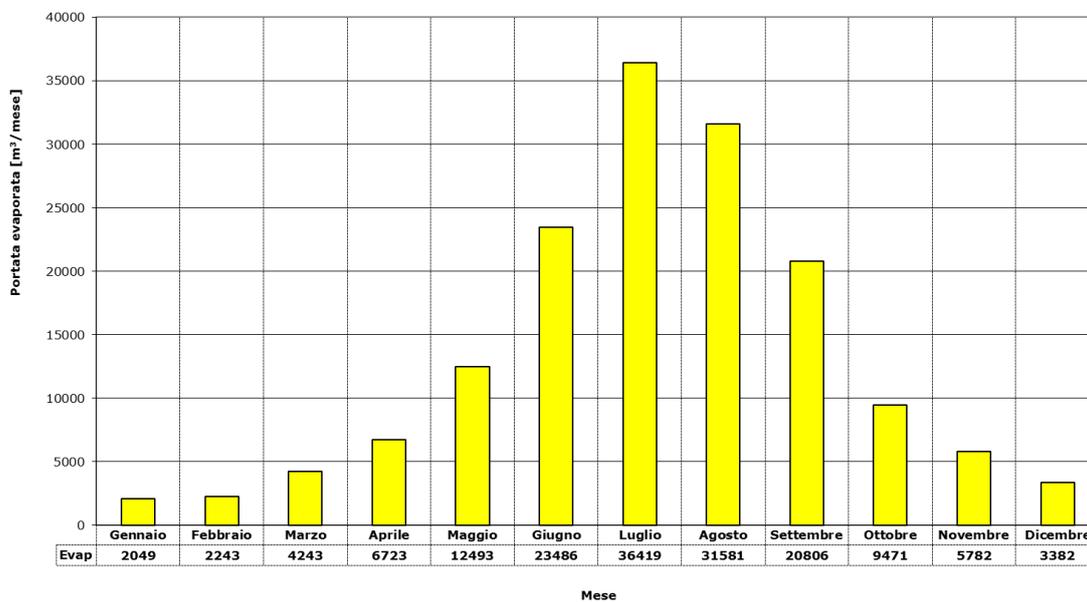


Figura 30: Lago di San Cipriano; evaporazione media mensile 1992-2010.

Portate in uscita - Lago di San Cipriano

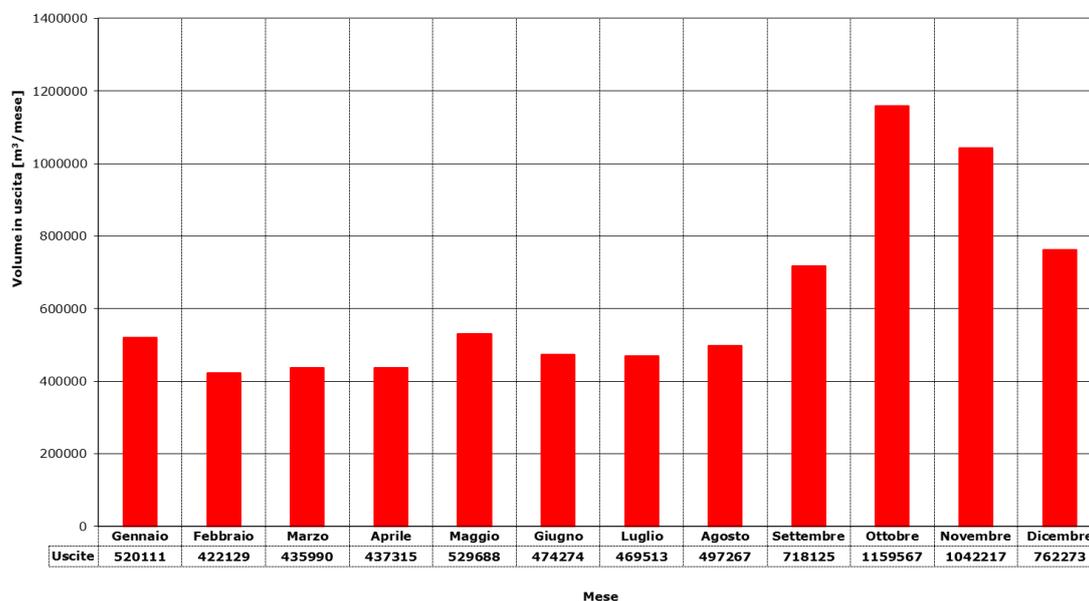


Figura 31: Lago di San Cipriano; portate in uscita medie mensili 1992-2010.

Deficit e Surplus : Lago di San Cipriano

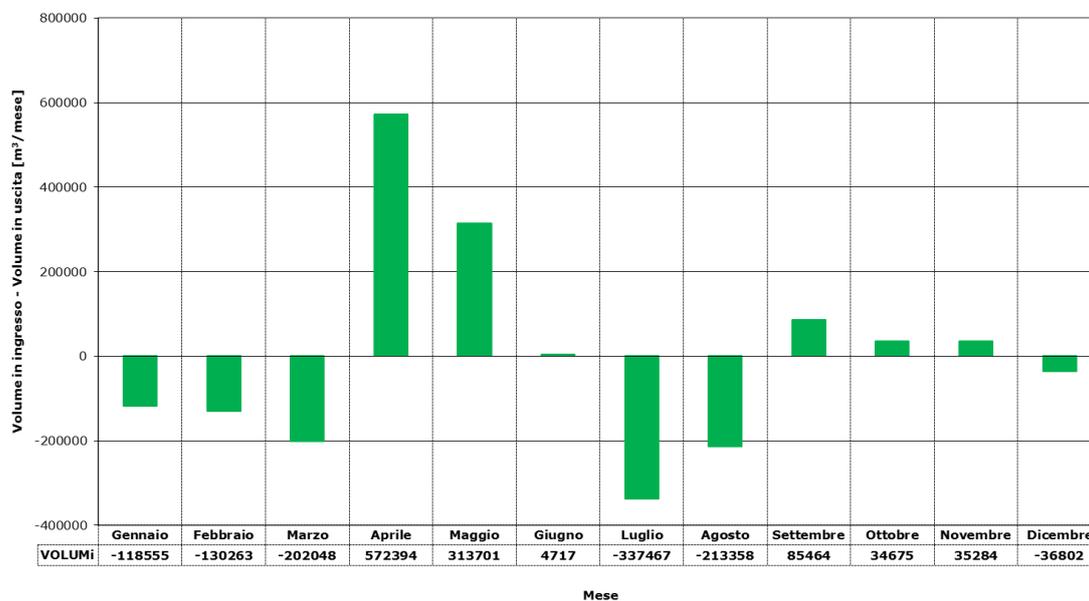


Figura 32: Lago di San Cipriano; deficit e surplus medi mensili 1992-2010.

Il livello del pelo libero del lago di San Cipriano mostra un andamento per lo più stagionale, infatti si notano degli abbassamenti marcati durante i mesi estivi sia in virtù delle minori precipitazioni sia, principalmente, per il venire a mancare delle portate pompate dall'Arno. Il livello tende poi a risalire naturalmente nei mesi di settembre e ottobre per poi stabilizzarsi durante i mesi invernali. Durante i mesi primaverili, nello specifico tra aprile e giugno, si nota un aumento progressivo del volume invasato e di conseguenza del livello del lago, poiché in questi mesi viene attivato il prelievo di portate dall'Arno che porta a raggiungere, il 1 luglio, il livello pari alla quota della massima regolazione, come richiesto dal disciplinare.

E' bene inoltre sottolineare che l'andamento del livello d'invaso nel periodo gennaio-settembre 2006 può essere affetto da errori a causa della ricostruzione dei dati mancanti come già mostrato al paragrafo 3.1.1.

Nello specifico, la sostituzione dei dati mancanti per le precipitazioni del 2006 con le precipitazioni mensili mediate sul periodo 1992-2010 ha avuto l'effetto di introdurre nel modello un periodo di piogge di intensità molto modesta (v. fig. 7) che sono state quasi interamente assorbite nella modellazione dall'infiltrazione nel sottosuolo riportata nel modello afflussi/deflussi.

3.4 Modellazione del bilancio idrico del lago di Allori

3.4.1 *Dati di input utilizzati*

Come già specificato, le caratteristiche geometriche principali del lago di Allori utilizzate per la modellazione sono le seguenti:

- | | |
|---|--------------------------|
| • fondo del lago: | 170.00 m s.l.m. |
| • quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta): | 183.00 m s.l.m. |
| • superficie alla quota di massima ritenuta: | 438 520 m ² |
| • volume alla quota di massima ritenuta: | 3 315 880 m ³ |
| • superficie bacino imbrifero: | 11.21 km ² |

Sono state inoltre ipotizzate le seguenti ulteriori condizioni al contorno:

- rilascio, verso il lago di Castelnuovo, di una portata turbinata ipotizzata costante pari a 40 l/s tramite un'opera di derivazione con opera di presa con soglia a quota 182.00 m s.l.m.;
- rilascio di una portata in uscita pari a 10 l/s tramite un'opera di derivazione con presa con soglia a quota 182.00 m s.l.m.;
- Il valore del coefficiente di deflusso utilizzato nella modellazione tiene conto anche della stima delle perdite di infiltrazione e evaporazione reale del bacino imbrifero.

L'applicazione del modello termo-idrologico è stata eseguita per il lago di Allori utilizzando come dati di input le grandezze meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare e velocità del vento) e le precipitazioni trasformate presentate al paragrafo 3.1.1.

La modellazione matematica è stata effettuata con passo giornaliero, per l'intero periodo di disponibilità dei dati, dal 1 settembre 1992 al 31 dicembre 2010.

3.4.2 *Risultati della modellazione*

Le simulazioni effettuate con il modello matematico termo-idrologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Allori sotto il profilo delle variazioni di temperatura, dell'evaporazione e dell'evoluzione dei livelli nelle condizioni ipotizzate.

La **temperatura dell'acqua** del bacino, concordemente con le aspettative, segue il ciclo stagionale, oscillando tra un minimo di circa 1°C in condizioni invernali e un massimo di circa 31°C in condizioni estive (fig. 33).

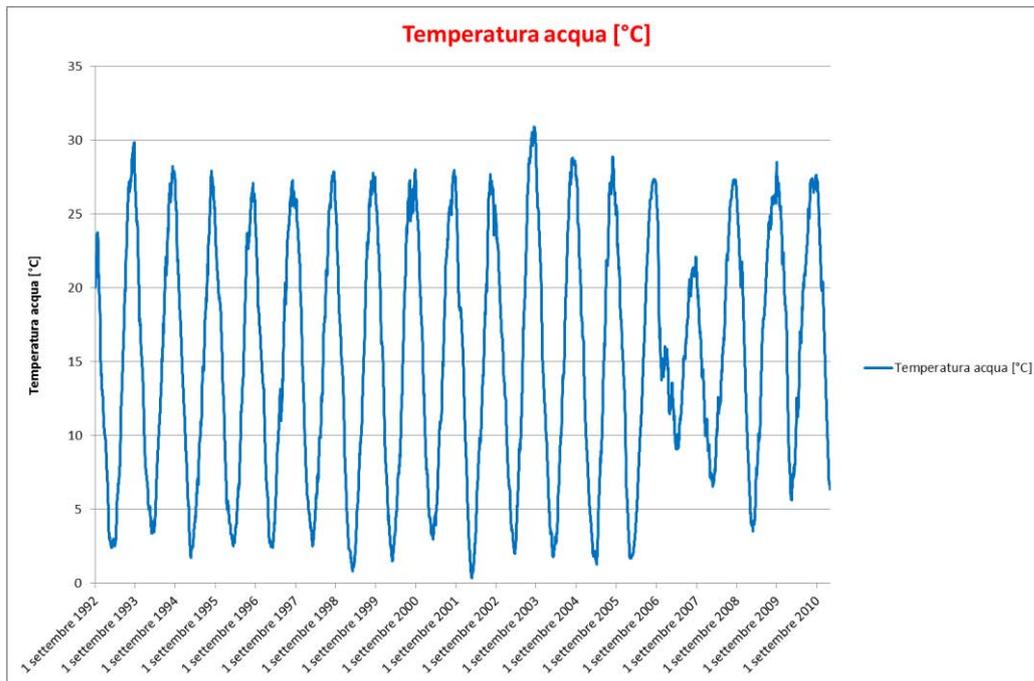


Figura 33: Temperatura dell'acqua nel bacino di Allori.

Nel corso dell'intero periodo (settembre 1992 - dicembre 2010) analizzato i valori medi mensili di **evaporazione netta** oscillano tra 0 m³/d nelle condizioni evaporative minime e circa 2600 m³/d nel periodo di massima evaporazione (fig. 34).

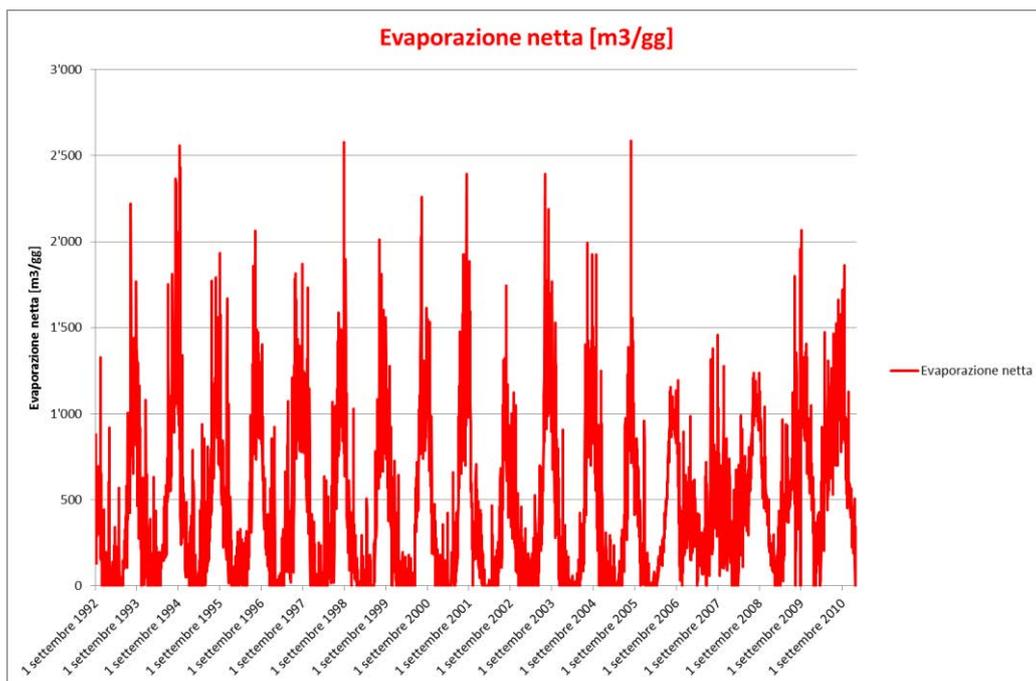


Figura 34: Evaporazione netta dallo specchio d'acqua di Allori [m³/gg].

L'andamento temporale dei **livelli del lago** (fig. 35) oscilla tra quota 182.54 e quota 183.60 m s.l.m., con un'escursione massima di 1.06 m.

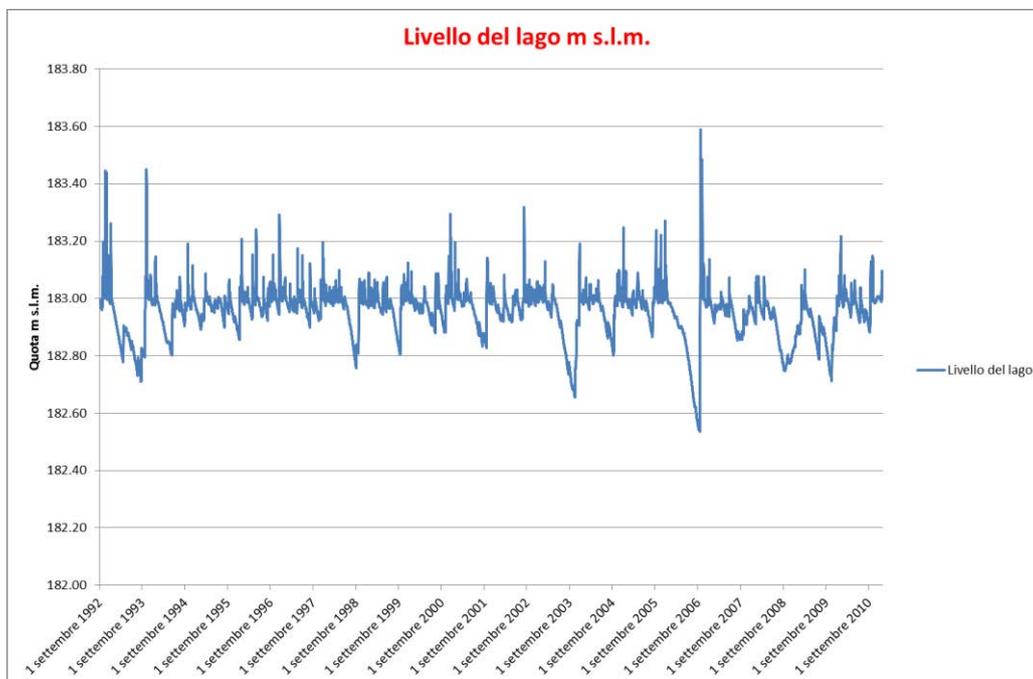


Figura 35: Lago di Allori; livello di invaso 1992-2010.

Portate in ingresso - Lago di Allori

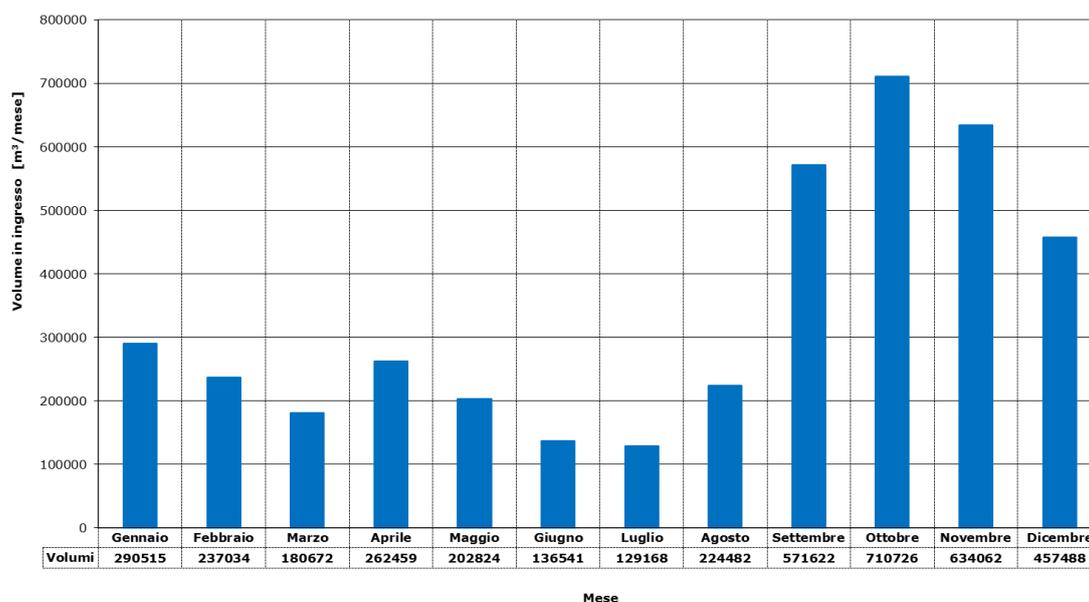


Figura 36: Lago di Allori; portate in ingresso medie mensili 1992-2010.

Evaporazione - Lago di Allori

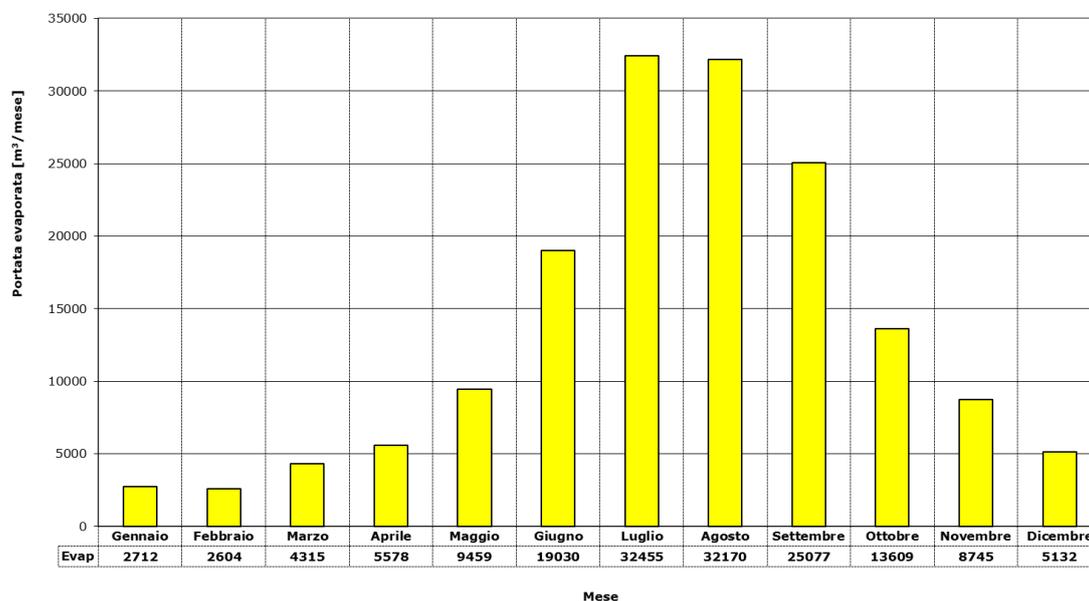


Figura 37: Lago di Allori; evaporazione media mensile 1992-2010.

Portate in uscita - Lago di Allori

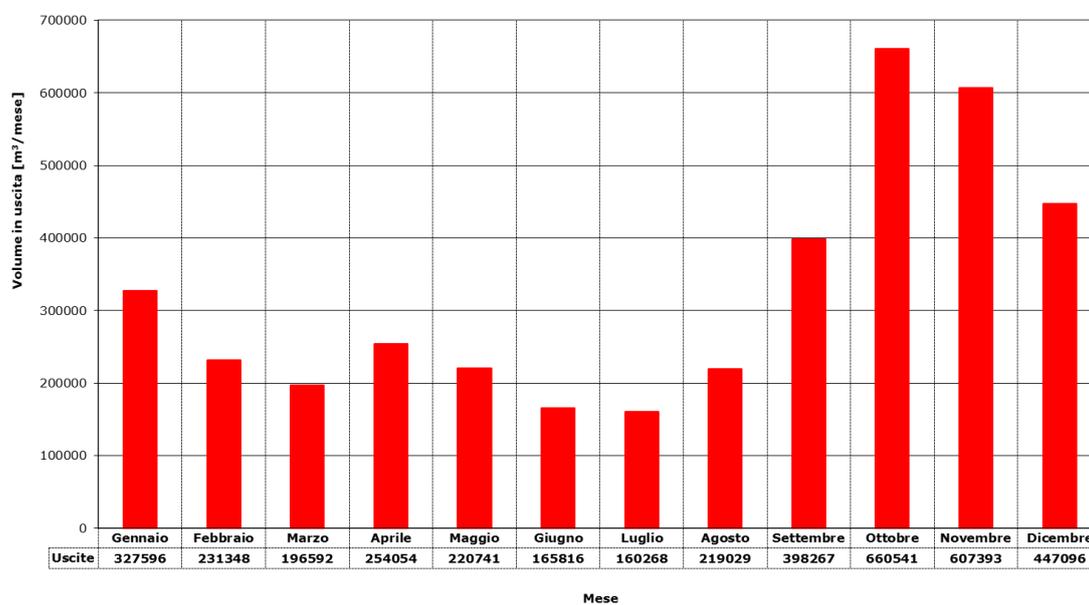


Figura 38: Lago di Allori; portate in uscita medie mensili 1992-2010.

Deficit e Surplus : Lago di Allori

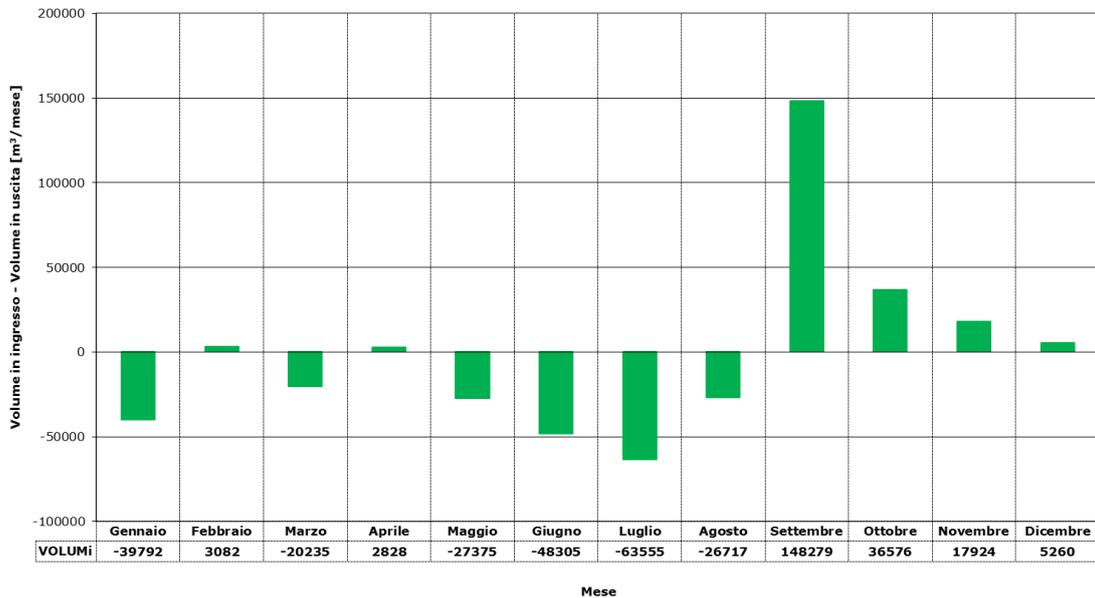


Figura 39: Lago di Allori; deficit e surplus medi mensili 1992-2010.

Il lago di Allori presenta una variabilità più elevata nei volumi e livelli di invaso, data soprattutto dalla portata costante in uscita per il turbinaggio, che incide in modo significativo sull'equilibrio dei bilanci idrici giornalieri.

Anche per Allori si ha una stagionalità della variazione dei volumi con decrementi durante i mesi estivi e aumenti durante quelli autunnali, in particolare nel mese di settembre.

Come nel caso precedente di San Cipriano è necessario ricordare che i dati anomali che si verificano nel periodo gennaio-settembre 2006 derivano da una mancanza di informazioni sopperita con la ricostruzione dei dati mostrata al paragrafo 3.1.1.

3.5 Valutazione dell'evaporazione potenziale e reale e della riserva idrica dei suoli

3.5.1 Evaporazione potenziale e reale

Per la stima dell'evaporazione media e potenziale si fa affidamento, in assenza di misure specifiche tramite evaporimetri, a formule presenti in letteratura.

Quando si parla di un bacino imbrifero che nel caso in esame è per lo più vegetato, è preferibile parlare di evapotraspirazione che comprende il flusso dell'acqua verso l'atmosfera sia dovuto alla traspirazione della vegetazione che l'evaporazione dal suolo. L'evapotraspirazione viene indicata tramite il tasso di evapotraspirazione che rappresenta l'altezza d'acqua evaporata in un certo periodo di tempo; può essere espressa quindi come mm/giorno, mm/mese o mm/anno. Nelle formule usate a seguire l'evapotraspirazione è stata misurata in mm/mese.

I fattori che influenzano l'evapotraspirazione sono i seguenti:

- **quota:** all'aumentare della quota diminuisce il potere evaporante dell'atmosfera poiché le temperature sono inferiori;
- **radiazione solare:** l'evapotraspirazione cresce all'aumentare della radiazione solare, quindi maggiore all'aumentare della latitudine e nel caso di giornate soleggiate;
- **velocità del vento:** l'aumentare dell'intensità del vento porta un aumento dell'evapotraspirazione poiché vengono favoriti i processi di diffusione del vapore verso l'alto;
- **contenuto idrico del suolo:** rappresenta la quantità d'acqua presente nei pori del terreno. Questo fattore risulta molto importante perché può essere un fattore limitante per l'evapotraspirazione dal suolo. Ad esempio nel caso di periodi siccitosi, la percentuale di acqua nel suolo tende a diminuire e quindi l'evaporazione reale è minore di quella che si avrebbe nel caso di terreno saturo.

L'**evapotraspirazione potenziale** è quella che avviene quando il contenuto idrico del suolo non costituisce un fattore limitante per essa, ovvero la disponibilità di acqua nel suolo è almeno pari alla quantità dell'acqua che il sistema suolo-vegetazione è in grado di far evaporare.

L'**evapotraspirazione reale** è invece il risultato dell'interazione tra suolo-vegetazione-atmosfera che realmente avviene. Essa tiene conto quindi dell'effettivo contenuto idrico del suolo e del tipo, sviluppo e stadio vegetativo della vegetazione presente. Per tali motivi, essendo ad esempio il contenuto idrico un fattore limitante, l'evapotraspirazione reale sarà minore di quella potenziale.

I risultati in figura 40 mostrano i valori di evapotraspirazione potenziale per l'area di Santa Barbara. Non è stato possibile calcolare l'evapotraspirazione reale poiché non si hanno informazioni sul tipo e sviluppo della vegetazione presente e sull'effettivo contenuto idrico del suolo.

La formula utilizzata è quella di Thornthwaite (1948):

$$(ET_p)_i = 16.2 * b_i \left(\frac{10 * T_i}{I} \right)^a$$

Dove:

- $(ET_p)_i$ = evapotraspirazione potenziale del mese i

- b_i : parametro che dipende dal numero medio di ore di insolazione giornaliera e dal numero di giorni nel mese i . Fissata la latitudine, per ogni mese i il valore è fornito in forma tabellare;
- a : $a = 0.5 + 0.016 I$, parametro che dipende dal numero medio di ore di insolazione giornaliera e dal numero di giorni nel mese i ;
- T_i : temperatura media del mese i ;
- I : indice termico annuale $I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}$

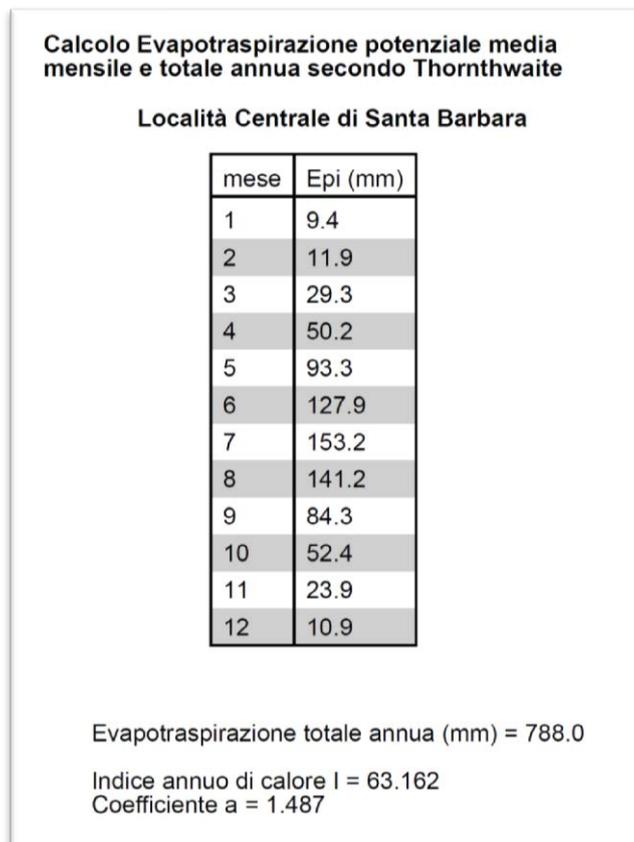


Figura 40: Evapotraspirazione potenziale dell'area in esame.

Il valore di evapotraspirazione potenziale totale annua è pari a circa 788 mm. Come sottolineato in precedenza tale valore è sicuramente maggiore dell'evapotraspirazione reale, poiché abbiamo come ipotesi che il terreno sia sempre in condizioni sature. Tale valore non è quindi, nella realtà, corrispondente alla reale evapotraspirazione che si ha nell'area di studio. Per tale motivo per quanto riguarda la modellazione idrologica, la stima dell'evapotraspirazione, calcolata dal programma, è stata inclusa nel calcolo del parametro del coefficiente di deflusso.

3.5.2 Riserva idrica dei suoli

La riserva idrica dei suoli o capacità d'acqua disponibile rappresenta la massima quantità di acqua in un suolo che può essere utilizzata dalle piante. E' data dalla differenza tra la quantità di umidità presente nel suolo alla capacità di campo e quella relativa al punto di appassimento permanente.

La figura 41 mostra il contenuto idrico alla tensione di 1500 kpa (punto di appassimento permanente) mentre la figura 42 alla tensione di 33 kpa (capacità di campo). I dati sono stati ricavati dalle carte pedologiche della regione Toscana.

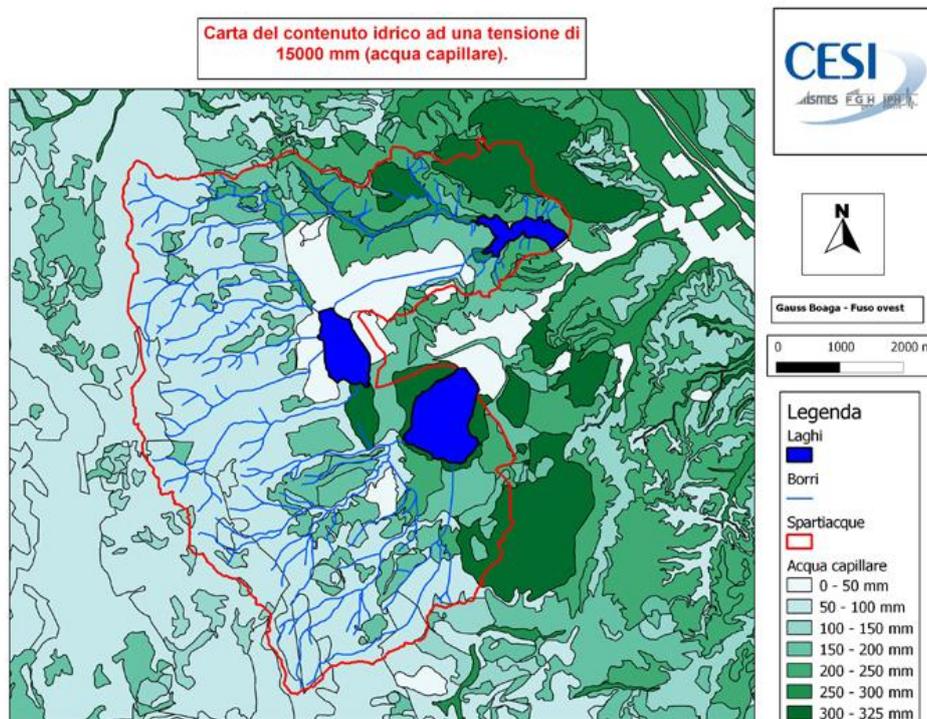


Figura 41: Contenuto idrico ad una tensione di 1500 kpa nei bacini imbriferi dei 3 laghi (fonte "carte pedologiche della regione Toscana")

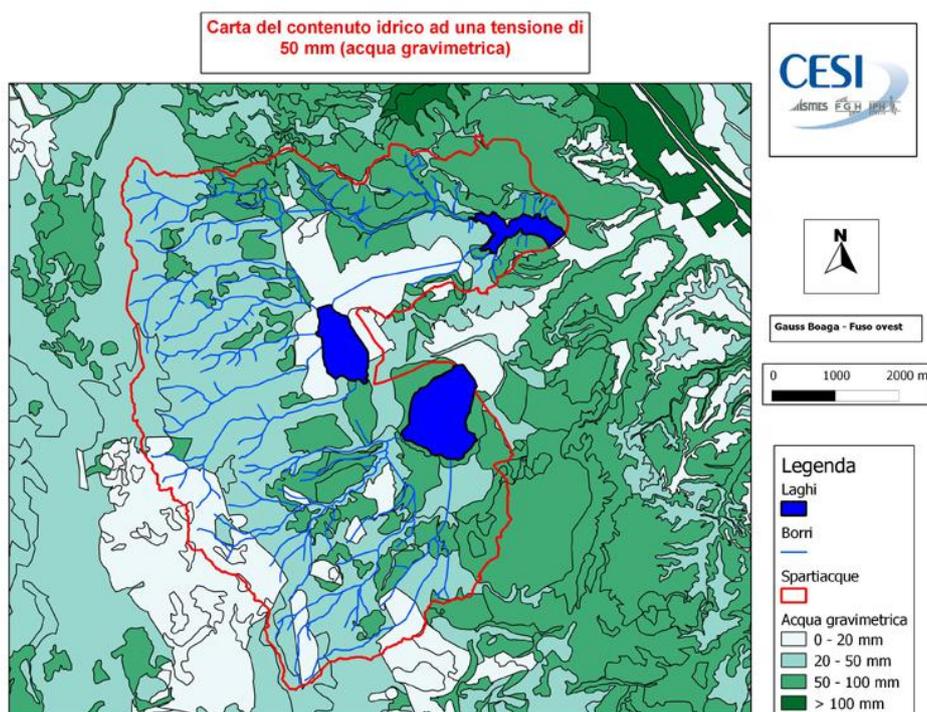


Figura 42: Contenuto idrico ad una tensione di 33 kpa nei bacini imbriferi dei 3 laghi (fonte "carte pedologiche della regione Toscana")

I risultati di riserva idrica dei suolo variano quindi da circa 0 a 300 mm con valori maggiori nella parte più a valle dei bacini.

4 VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RICAMBIO DEI TRE LAGHI

Le considerazioni idrologiche trattate nel capitolo precedente hanno consentito di valutare, con i dati del periodo in esame, i principali parametri idrologici dei tre laghi, tra i quali le portate in ingresso ai bacini imbriferi, le portate evaporate dalla superficie dei laghi e le portate rilasciate verso valle (sia naturalmente per superamento della quota di massima ritenuta sia come deflussi costanti durante l'anno verso il corpo idrico ricettore). Oltre a tali contributi sono state inoltre considerate le portate turbinate dal lago di Allori verso il lago di Castelnuovo in modo da avere una previsione realistica delle portate rilasciate da Allori che confluiranno tramite il borro Meleto verso il lago di San Cipriano.

L'andamento di questi parametri ha permesso inoltre di stimare il tempo di ricambio dei tre laghi per gli anni per i quali è stata eseguita la modellazione.

Il tempo teorico di ricambio (o di residenza) di un lago è il tempo che impiega il corpo idrico emissario per far defluire un volume d'acqua pari a quello dell'invaso; ad esempio, il ricambio risulta rapido in quei laghi che hanno un piccolo volume e un emissario di grande portata. Il parametro rende conto della capacità dell'emissario di scaricare all'esterno del lago parte degli eventuali inquinanti che a esso giungono dal proprio bacino imbrifero tramite il corpo idrico immissario.

Il tempo teorico di ricambio delle acque di un lago si calcola dividendone il volume per la portata annua dell'emissario.

Le portate annue degli emissari di Castelnuovo, Allori e San Cipriano mostrate nelle successive tabelle 6, 7 e 8 sono da considerarsi teoriche poiché fanno riferimento al nuovo assetto idrografico previsto nel progetto di sistemazione della rete drenante esistente, non ancora realizzato.

4.1.1 *Valutazione del tempo di ricambio del lago di Castelnuovo*

Le considerazioni sopra esposte sul calcolo del tempo di ricambio di un vaso sono state applicate al lago di Castelnuovo, per il quale è stato ipotizzato di non considerare le perdite per infiltrazione e neppure il volume assorbito dal terreno in quanto la tenuta idraulica dell'invaso è garantita dalla bassa permeabilità dei terreni di riempimento del cavo e dalla situazione idraulica del sottosuolo nelle aree circostanti, caratterizzata da livelli piezometrici superiori alla quota di massima ritenuta del lago.

Per il calcolo è stato utilizzato il volume alla quota di massima ritenuta (147.00 m s.l.m.), pari a 12 102 000 m³. I risultati sono presentati in tabella 6.

Tabella 6: Tempi di ricambio previsti per il bacino di Castelnuovo.

Anno	Portata annua emissario [10^6 m^3]	Tempo di ricambio [mesi]
1993	8.24	17.6
1994	5.70	25.5
1995	5.63	25.8
1996	10.69	13.6
1997	8.82	16.5
1998	6.56	22.2
1999	7.21	20.1
2000	9.54	15.2
2001	6.58	22.1
2002	7.77	18.7
2003	5.74	25.3
2004	7.61	19.1
2005	10.73	13.5
2006	11.53	12.6
2007	3.95	36.7
2008	4.96	29.3
2009	5.45	26.6
2010	8.70	16.7
Medie	7.5	20.9

Dall'analisi dei dati sopra esposti si può ritenere che in condizioni medie il lago di Castelnuovo avrà un tempo di ricambio pari a circa 21 mesi.

4.1.2 Valutazione del tempo di ricambio del lago di San Cipriano

La valutazione del tempo di ricambio per San Cipriano è stata calcolata tenendo conto del DMV previsto in uscita e dalla portata utilizzata per il funzionamento della centrale.

Per il calcolo è stato utilizzato il volume alla quota di massima regolazione (152.30 m s.l.m.), pari a $2\,245\,273 \text{ m}^3$. I risultati sono presentati in tabella 7.

Tabella 7: Tempi di ricambio previsti per il bacino di San Cipriano.

Anno	Portata annua emissario [10^6 m^3]	Tempo di ricambio [mesi]
1993	8.11	3.3
1994	5.77	4.7
1995	5.15	5.2
1996	9.51	2.8
1997	7.71	3.5
1998	5.31	5.1
1999	6.04	4.5
2000	9.50	2.8
2001	5.92	4.6
2002	6.70	4.0
2003	5.75	4.7
2004	6.41	4.2
2005	10.58	2.5
2006	12.19	2.2
2007	5.16	5.2
2008	5.15	5.2
2009	5.27	5.1
2010	5.77	4.7
Medie	7.0	4.1

Come emerge dalla tabella sopra il tempo di ricambio medio per il bacino di San Cipriano è abbastanza breve (attorno ai 4 mesi) e questo è dovuto principalmente a due fattori.

Il primo riguarda il fatto che il bacino di San Cipriano non presenta volumi d'acqua molto elevati (poco più di 2 milioni di metri cubi alla quota di massimo utilizzo), il secondo fattore è dato dalle portate in uscita che si mantengono elevate e costanti durante tutto l'anno sia per soddisfare il DMV verso il corpo idrico ricettore sia (principalmente) per il fabbisogno della centrale. Le portate in uscita vengono in parte recuperate dalla portata in arrivo dall'Arno che quindi garantisce un buon ricircolo delle acque nel bacino.

4.1.3 Valutazione del tempo di ricambio del lago di Allori

La valutazione del tempo di ricambio per Allori è stata calcolata tenendo conto del rilascio verso il corpo idrico ricettore e della portata turbinata verso il lago di Castelnuovo; è stato inoltre ipotizzato di non avere perdite per infiltrazione in quanto la tenuta idraulica del bacino è garantita dalla bassa permeabilità dei terreni su cui sorge il lago. In aggiunta la situazione idraulica del sottosuolo nelle aree circostanti è caratterizzata da livelli piezometrici superiori alla quota di massima ritenuta del lago (183.00 m s.l.m.).

Per il calcolo è stato utilizzato il volume alla quota di massima ritenuta (183.00 m s.l.m.), pari a 3 315 880 m³ e si è ipotizzato che l'opera per la captazione delle portate turbinate dal lago di Allori verso il lago di Castelnuovo sia ubicata all'interno del bacino di Allori. I risultati sono presentati in tabella 8.

Tabella 8: Tempi di ricambio previsti per il bacino di allori.

Anno	Portata annua emissario [10 ⁶ m ³]	Tempo di ricambio [mesi]
1993	4.01	9.9
1994	2.75	14.5
1995	2.39	16.7
1996	5.55	7.2
1997	4.41	9.0
1998	3.16	12.6
1999	3.50	11.4
2000	4.82	8.3
2001	3.28	12.1
2002	3.64	10.9
2003	2.74	14.5
2004	3.81	10.5
2005	5.60	7.1
2006	5.85	6.8
2007	1.76	22.6
2008	2.19	18.1
2009	2.16	18.4
2010	4.42	9.0
Medie	3.7	12.2

Dall'analisi dei dati sopra esposti si può ritenere che in condizioni medie il lago di Allori avrà un tempo di ricambio pari a circa 12 mesi. Il valore è maggiore rispetto al bacino di San Cipriano sia per il maggior volume dell'invaso di Allori che per le minori portate in entrata/uscita dal bacino stesso.

5 MODELLAZIONE DEL BILANCIO BIOCHIMICO

5.1 Qualità delle acque superficiali dei bacini imbriferi sottesi ai laghi di Castelnuovo, Allori e San Cipriano

La caratterizzazione chimico-fisica e igienico-sanitaria delle acque superficiali dei bacini imbriferi sottesi ai laghi di Castelnuovo, Allori e San Cipriano è stata effettuata partendo da condizioni iniziali derivate sulla base di una serie di campionamenti condotti tra il 14 e il 16 maggio 2013 nei seguenti corsi d'acqua:

- lago San Cipriano,
 - immissari del lago San Cipriano: borro Frati, borro Meleto
- lago Castelnuovo,
 - immissari del lago Castelnuovo: borro Valli, borro Percussente, borro Bicchieraie, borro Pianale, borro Bacherozzolo
- lago Allori,
 - immissari del lago Allori: borro Sinciano, borro Pago, borro Campocigoli, borro Molinuzzo

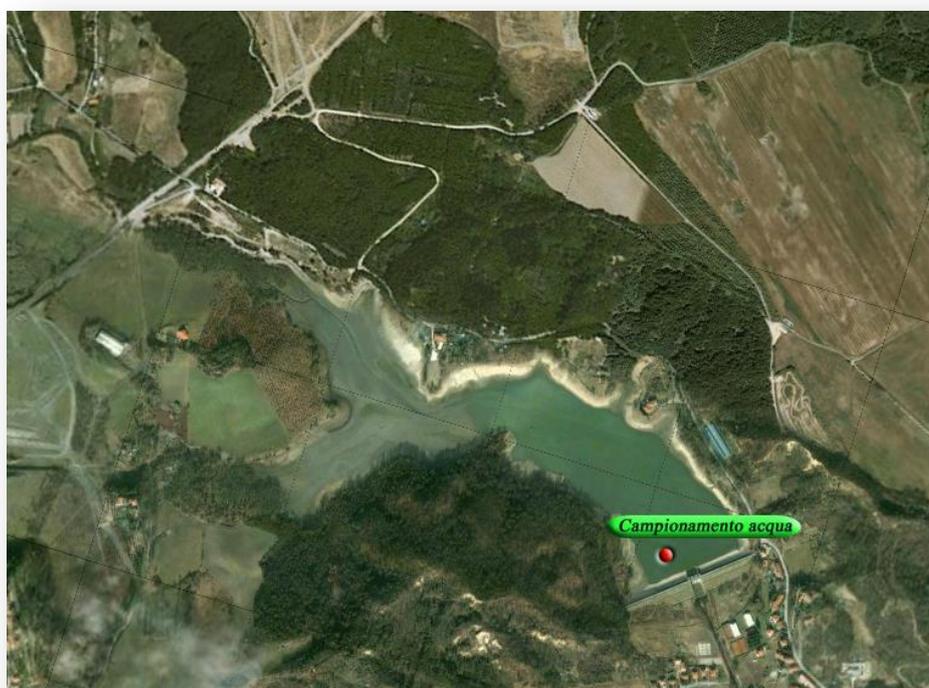


Figura 43: Ubicazione del punto di prelievo lago S. Cipriano (fonte Google Earth).



Figura 44: Ubicazione dei punti di prelievo laghi di Allori e Castelnuovo (fonte Google Earth).



Borro Frati



Borro Meleto



Borro Valli



Borro Percussente



Borro Bicchieraie



Borro Pianale



Borro Bacherozzolo



Borro Sinciano



Borro Pago



Borro Campocigoli



Borro Molinuzzo

Figura 45: Immagini dei punti di prelievo nei vari borri oggetto di campionamento nel maggio 2013



Lago S. Cipriano



Lago Allori



Lago Castelnuovo

Figura 46: Immagini dei corpi idrici principali oggetto di campionamento nel maggio 2013

La caratterizzazione qualitativa delle acque è stata condotta secondo il capitolo 2 dell'allegato I alla parte III del DLgs 152/06, "Modalità per la classificazione dello stato di qualità dei corpi idrici – stato delle acque superficiali". Tra gli elementi qualitativi indicati nel DLgs 152/06 sono stati analizzati quelli ritenuti maggiormente significativi e di diretta applicabilità ai fini della classificazione dello stato ecologico dei bacini nel presente studio. Sulla base dei dati disponibili, a maggior completezza di informazione, sono stati considerati anche quei parametri utili ai fini della classificazione secondo il cap. 3 dell'allegato 1 del DLgs 152/99 e ss.mm.ii. "Monitoraggio e classificazione delle acque in funzione degli obiettivi di qualità ambientale".

Per l'aggiornamento del modello si è fatto riferimento, come indicato, ai dati del rilievo eseguito nel maggio 2013.

La classificazione ecologica delle acque è stata eseguita sia ai sensi del D.Lgs. 152/99, sia del vigente DLgs 152/06 e ss.mm.ii.. I giudizi riportati nel testo si riferiscono ai risultati chimico-fisici della campagna sperimentale condotta nel maggio 2013, durante la quale non sono stati effettuati monitoraggi di tipo biologico. Le misure e le analisi sono state eseguite applicando le metodiche analitiche nazionali e internazionali ufficialmente riconosciute elencate nella tabella seguente.

Tabella 9: Metodi di misura e analisi

Prova	Procedura
Temperatura, pH, Conducibilità, Ossigeno disciolto	Manuale Hydrolab
Clorofilla <i>a</i>	APAT CNR-IRSA Metodo 9020 Man 29/2003
Alcalinità	APAT CNR-IRSA Metodo 2010 A Man 29/2003
Azoto totale, Azoto ammoniacale, Azoto nitroso e nitrico, Fosforo totale, Fosforo solubile	Manuale DR 5000
Trasparenza (disco di Secchi)	IBP Handbook n. 8
Metalli	EPA 6020A 2007
<i>Escherichia coli</i>	APAT CNR-IRSA Metodo 7030 F Man 29/2003
Enterobatteri	APAT CNR-IRSA Metodo 7040 Appendice A Man 29/2003

5.1.1 Criteri di classificazione dei corsi d'acqua

Nella tabella seguente sono riportati i macrodescrittori previsti dal DLgs 152/99 unitamente ai punteggi relativi secondo le concentrazioni rilevate. Si tenga presente che la classificazione dello stato ecologico è effettuato incrociando il dato risultante dai macrodescrittori con il risultato dell'IBE, attribuendo al tratto rappresentato dalla sezione in esame il risultato peggiore tra quelli derivati dalle valutazioni relative ad IBE e macrodescrittori; poiché non si dispone del valore di indice IBE nei siti dei prelievi, il giudizio formulato nasce dalla valutazione dei soli parametri chimico-fisici.

Tabella 10: Schema di classificazione previsto dal DLgs 152/99

Parametro	Unità misura	Livello di inquinamento espresso dai macrodescrittori				
		Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5
100 % OD %	%saturazione	≤ 10	≤ 20	≤ 30	≤ 50	≥ 50
BOD ₅	mg O ₂ /l	<2,5	≤4	≤8	≤15	>15
COD	mg O ₂ /l	<5	≤10	≤15	≤25	>25
Ammonio	mg N/l	< 0,03	≤0,1	≤0,5	≤1,5	>1,5
Nitrati	mg N/l	< 0,30	≤1,5	≤5	≤10	>10
Fosforo totale	mg P/l	< 0,07	≤0,15	≤0,30	≤0,6	>0,6
<i>Escherichia coli</i>	N/100 ml	<100	≤1.000	≤5.000	≤20.000	>20.000
Punteggio da attribuire per ogni parametro analizzato	75° percentile del periodo di rilevamento	80	40	20	10	5
Livello di inquinamento dai macrodescrittori		480÷560	240÷475	120÷235	60÷115	<60

Stato ecologico dei corsi d'acqua	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Livello di inquinamento dai macrodescrittori	480 - 560	240 - 475	120 - 235	60 - 115	< 60

Di seguito si riporta lo schema di classificazione proposto dal DLgs. 152/06 e ss.mm.ii, allegato 1, punto A4.1.2.

La procedura attualmente prevista dalla normativa vigente prevede che sia calcolato un punteggio sulla base della concentrazione dei seguenti macrodescrittori: N-NH₄, N-NO₃, Fosforo totale e Ossigeno disciolto (100 - % di saturazione O₂).

Tabella 11: Schema di classificazione previsto dal DLgs 152/06

Tab. 4.1.2/a - Soglie per l'assegnazione dei punteggi ai singoli parametri per ottenere il punteggio LIMeco

	Punteggio*	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5
		1	0,5	0,25	0,125	0
Parametro						
100-O ₂ % sat.		≤ 10	≤ 20	≤ 40	≤ 80	> 80
N-NH ₄ (mg/l)	** Soglie	< 0,03	≤ 0,06	≤ 0,12	≤ 0,24	>0,24
N-NO ₃ (mg/l)		< 0,6	≤ 1,2	≤ 2,4	≤ 4,8	>4,8
Fosforo totale (µg/l)		< 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	>400

* Punteggio da attribuire al singolo parametro

** Le soglie di concentrazione corrispondenti al Livello 1 sono state definite sulla base delle concentrazioni osservate in campioni (115) prelevati in siti di riferimento (49), appartenenti a diversi tipi fluviali. In particolare, tali soglie, che permettono l'attribuzione di un punteggio pari a 1, corrispondono al 75° percentile (N-NH₄, N-NO₃, e Ossigeno disciolto) o al 90° (Fosforo totale) della distribuzione delle concentrazioni di ciascun parametro nei siti di riferimento. I siti di riferimento considerati fanno parte di un database disponibile presso CNR-IRSA.

Il LIM_{eco} di ciascun campionamento viene derivato come media tra i punteggi attribuiti ai singoli parametri secondo le soglie di concentrazione indicate nella tabella 11, in base alla concentrazione osservata.

Il valore medio di LIM_{eco} calcolato è utilizzato per attribuire la classe di qualità al sito, secondo i limiti indicati nella successiva tabella 12.

Tabella 12: Schema di classificazione previsto dal DLgs 152/06

Tab. 4.1.2/b - Classificazione di qualità secondo i valori di LIMeco

Stato	LIMeco
Elevato*	≥ 0,66
Buono	≥ 0,50
Sufficiente	≥ 0,33
Scarso	≥ 0,17
Cattivo	< 0,17

* Il limite tra lo stato elevato e lo stato buono è stato fissato pari al 10° percentile dei campioni ottenuti da siti di riferimento

5.1.2 Caratterizzazione dei corsi d'acqua

I risultati analitici della campagna sperimentale eseguita nel maggio 2013 sono riportati nelle tabelle seguenti.

Tabella 13: Caratteristiche chimico-fisiche dei corsi d'acqua

Corsi d'acqua	Temperatura (°C)	Conducibilità a 25° (µS/cm)	Saturazione O ₂ (%)	O.D. (mg/l O ₂)	pH
Borro Valli o Cerrecchia	12.6	558	91	9.5	6.86
Borro Percussente	11.9	528	100	10.8	8.43
Borro Bicchieraie	13.6	702	95	9.2	8.15
Borro Pianale	13.3	582	99	10.3	8.38
Borro Bacherozzolo	12.9	517	98	10.1	8.44
Borro Sinciano	12.6	442	99	10.5	8.08
Borro Pago o Mulinaccio	12.5	391	99	10.3	8.44
Borro Campocigoli	12.8	451	95	9.5	7.56
Borro Molinuzzo	15.4	674	98	9.7	8.14
Borro Frati	18.3	588	101	10.5	8.35
Borro Meleto	14.6	1504	90	9.2	6.86

Tabella 14: Concentrazioni dei "macrodescriptors" che vengono utilizzati per definire la qualità dell'acqua in un corso d'acqua secondo il D.Lgs 152/99 e secondo il DLgs 152/06

Elemento o composto	u.d.m.	Borro Valli	Borro Percussente	Borro Bicchieraie	Borro Pianale	Borro Bacherozzolo	Borro Sinciano	Borro Mulinaccio o Pago	Borro Campocigoli	Borro Molinuzzo	Borro Frati	Borro Meleto
Nitrati	mg/l N-NO ₃	0.245	0.244	0.853	1.21	0.231	0.366	<0.23	0.251	0.316	0.831	0.823
Nitriti	mg/l N-NO ₂	<0.015	<0.015	<0.015	0.632	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	0.053	0.151
Ammonio	mg/l N-NH ₄	0.016	<0.015	0.024	1.63	0.019	<0.015	0.033	0.035	<0.015	0.023	0.104
N-tot	mg/l N	<1	<1	<1	3.51	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.1
P-PO ₄	mg/l P	<0.05	<0.05	<0.05	0.253	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
P tot	mg/l P	<0.05	<0.05	<0.05	0.261	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
COD	mg/l O ₂	10.2	6.72	6.39	15.6	6.19	<5	5.33	14.8	5.81	11.1	7.22
BOD ₅	mg/l O ₂	1.2	0.1	0.9	5	1.1	0.5	0.5	1.7	0.6	0.8	0.4

Elemento o composto	u.d.m.	Borro Valli	Borro Percussente	Borro Bicchieraie	Borro Pianale	Borro Bacherozzolo	Borro Sinciano	Borro Mulinaccio o Pago	Borro Campocigoli	Borro Molinuzzo	Borro Frati	Borro Meleto
Cloruri	mg/l Cl	6.46	6.57	9.34	7.61	6.47	6.77	6.16	5.76	6.7	7.28	12.1
Solfati	mg/l SO ₄	34.0	28.0	42	32.4	30.3	17.7	15.5	23.9	107	55	376
Sol. Sosp.	mg/l	0.67	5.98	8.44	2.28	7.92	12.18	4.01	3.25	1.66	1.87	1.99
Durezza	mg/l CaCO ₃	297.2	295.5	348.9	288.3	277.7	240.3	206.5	119.4	345.3	286.6	774.3
Alcalinità	mg/l CaCO ₃	241.2	234.6	289.6	241.2	220.2	216.8	168.2	192.4	248.8	230.4	450.4
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	110	60	235	26000	200	20	120	1650	<1	60	30

Il giudizio sullo stato ecologico dei corsi d'acqua relativo ai rilievi sperimentali condotti nel maggio 2013 è riportato nel prospetto seguente, in riferimento al DLgs 152/99 e all'attuale DLgs152/06 e ss.mm.ii.:

Tabella 15: Stato ecologico dei borri dell'area di S.Barbara

Borri	Livello di inquinamento da macrodescrittori secondo il DLgs 152/99	Stato ecologico dei corsi d'acqua secondo il DLgs 152/99	Punteggio LIM _{eco} secondo il DLgs 152/06	Classificazione di qualità secondo i valori di LIM _{eco} secondo il DLgs 152/06
Valli	460	Classe 2	1	Elevato
Percussente	520	Classe 1	1	Elevato
Bicchieraie	440	Classe 2	0.875	Elevato
Pianale	180	Classe 3	0.406	Sufficiente
Bacherozzolo	480	Classe 1	1	Elevato
Sinciano	520	Classe 1	1	Elevato
Mulinaccio	440	Classe 2	0.875	Elevato
Campocigoli	400	Classe 2	0.875	Elevato
Molinuzzo	480	Classe 1	1	Elevato
Frati	460	Classe 2	0.875	Elevato
Meleto	440	Classe 2	0.688	Elevato

Come si può osservare lo stato ecologico dei corsi d'acqua presi in considerazione è compreso quasi sempre tra la Classe 1 e la Classe 2 secondo il DLgs152/99, e risulta sempre elevato secondo il DLgs152/06, con l'eccezione del borro Pianale che risulta caratterizzato da alte concentrazioni di tutti i parametri, soprattutto fosforo, nitrati, ammonio e COD.

Sui campioni di acqua prelevati nei corsi d'acqua sono stati, inoltre, determinati i parametri riportati nella tabella sottostante che, confrontati con i limiti di legge elencati nell'allegato I del D.M. Ambiente 260/2010, sono conformi allo standard di qualità delle acque superficiali.

Tabella 16: Standard di qualità delle acque dei borri.

Elemento	Arsenico	Cadmio	Cromo tot	Mercurio	Nichel	Piombo
u.d.m	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Borro Valli	<1	<0.1	0.758	<0.1	1.2	<0.5
Borro Percussente	1.2	<0.1	1.4	<0.1	1.13	<0.5
Borro Bicchieraie	<1	<0.1	0.41	<0.1	1.5	<0.5
Borro Pianale	<1	<0.1	0.749	<0.1	1.07	<0.5
Borro Bacherozzolo	<1	<0.1	0.274	<0.1	<1	<0.5
Borro Sinciano	<1	<0.1	0.169	<0.1	<1	<0.5
Borro Mulinaccio	<1	<0.1	0.207	<0.1	<1	<0.5
Borro Campocigoli	<1	<0.1	1.08	<0.1	1.3	<0.5
Borro Molinuzzo	<1	<0.1	1.05	<0.1	1.01	<0.5
Borro Frati	<1	0.201	0.347	<0.1	1.8	<0.5
Borro Meleto	<1	<0.1	1.9	<0.1	2.8	<0.5
Concentrazione limite SQA-MA D.M. 260/2010	10	0.15	7	0.03	20	7.2
Concentrazione limite SQA-CMA D.M. 260/2010	-	0.9	-	0.06	-	-

SQA-MA: Standard di qualità ambientale espresso come valore medio annuo

SQA-CMA: Standard di qualità ambientale espresso come concentrazione massima ammissibile

Per maggiore completezza d'informazione e allo scopo di valutare lo stato dei corsi d'acqua dal punto di vista delle condizioni di vita offerte all'ittiofauna e alla vita acquatica in generale, le caratteristiche della sua acqua e il suo livello di inquinamento sono stati confrontati con gli standard previsti dall'allegato 2 al DLgs 152/06. Inoltre, sono stati considerati anche i limiti di qualità previsti per la balneazione dal D.M. 30/03/2010 di applicazione della Direttiva 2006/7/CE, già recepita in Italia con il DLgs. 30 maggio 2008, n. 116.

Tabella 17: Analisi microbiologiche per la verifica della balneabilità del sito.

UFC/100 ml	Borro Valli	Borro Percussente	Borro Bicchieraie	Borro Pianale	Borro Bacherozzolo	Borro Sinciano	Borro Mulinaccio o Pago	Borro Campocigoli	Borro Molinuzzo	Borro Frati	Borro Meleto	D.M. 30/03/2010
<i>Escherichia coli</i>	110	60	235	26000	200	20	120	1650	< 1	60	30	1000 UFC/100 ml
Enterococchi intestinali	295	40	375	21000	767	4	455	3950	140	300	75	500 UFC/ 100 ml

Dal punto di vista della tutela della fauna ittica, la maggior parte dei parametri considerati risulta in linea con i limiti di qualità previsti dal DLgs 152/06 ss. mm. ii. per le acque salmonicole, con l'eccezione della concentrazione di fosforo totale e ammoniaca nel Borro Pianale che superano i valori imperativi per la tutela della fauna ittica.

Allo stato attuale i borri si possono considerare come corpi d'acqua adatti alla vita dei salmonidi con l'eccezione del borro Pianale, almeno in riferimento ai valori di fosforo totale e ammoniaca.

In relazione alle caratteristiche di qualità per le acque superficiali destinate alla produzione di acqua potabile, tutti i parametri rispettano i limiti previsti per la categoria A1, ad eccezione della concentrazione di solfati nel borro Meleto (che rispetta i limiti imposti per la categoria A3) e della concentrazione di ammoniaca nel borro Pianale (che rispetta i limiti per la categoria A3) e del borro Meleto (che rispetta i limiti della categoria A2).

Le analisi microbiologiche svolte hanno messo in evidenza che le acque dei borri Valli, Percussente, Bicchieraie, Sinciano, Mulinaccio, Molinuzzo, Frati e Meleto hanno caratteristiche idonee alla balneazione, mentre quelle dei borri Pianale, Bacherozzolo (in ingresso al lago di Castelnuovo) e Campocigoli (affluente del lago di Allori) mostrano valori di *Escherichia coli* e Enterococchi superiori ai limiti di legge.

5.1.3 Criteri di classificazione delle acque degli invasi

La classificazione dello stato trofico dei laghi è stata effettuata secondo il DLgs n° 152/99 come indicato nella tabella seguente. La classe da attribuire è quella che emerge dal risultato peggiore tra i quattro parametri esaminati.

Tabella 18: Classificazione dello stato trofico secondo il DLgs 152/99

PARAMETRO	CLASSE I	CLASSE II	CLASSE III	CLASSE VI	CLASSE V
Trasparenza (m) (valore minimo)	>5	≤ 5	≤ 2	≤ 1,5	≤ 1
Ossigeno ipolimnico (%sat.) (valore minimo misurato nel periodo di massima stratificazione)	> 80%	≤ 80 %	≤ 60 %	≤ 40%	≤ 20%
Clorofilla "a" (µg/l) (valore massimo)	< 3	≤ 6	≤ 10	≤ 25	> 25
Fosforo totale (P µg/l) (valore massimo)	< 10	≤ 25	≤ 50	≤ 100	> 100

La classificazione è stata effettuata anche secondo il DLgs 152/06 che prevede di integrare i valori di fosforo totale, trasparenza e ossigeno disciolto in un singolo descrittore LTL_{eco} , la cui procedura di calcolo prevede l'assegnazione di un punteggio per i parametri misurati in sito, sulla base di quanto indicato nelle tabelle seguenti.

Tabella 19: Classificazione dello stato trofico secondo il DLgs 152/06
Tab. 4.2.2/a - Individuazione dei livelli per il Fosforo Totale (µg/l)

Valore di fosforo per macrotipi		Livello 1	Livello 2	Livello 3
	Punteggio	5	4	3
L1, L2, I1, I2		≤ 8 ^(*)	≤ 15	>15
L3, L4, I3, I4		≤ 12 ^(**)	≤ 20	>20

^(*) Valori di riferimento < 5 µg/l

^(**) Valori di riferimento < 10 µg/l

Tab. 4.2.2/b - Individuazione dei livelli per la trasparenza (metri)

Valore di trasparenza per macrotipi		Livello 1	Livello 2	Livello 3
	Punteggio	5	4	3
L1, L2, I1, I2		≥ 10 ^(*)	≥ 5,5	<5,5
L3, L4, I3, I4		≥ 6 ^(**)	≥ 3	< 3

^(*) Valori di riferimento >15 m

^(**) Valori di riferimento >10 m

Tab. 4.2.2/c - Individuazione dei livelli per l'Ossigeno disciolto (% saturazione)

Valore di ossigeno disciolto per macrotipo		Livello 1	Livello 2	Livello 3
	Punteggio	5	4	3
Tutti		> 80 % ^(*)	> 40 % < 80 %	≤ 40 %

^(*) Valori di riferimento >90 %

La somma dei punteggi ottenuti per i singoli parametri costituisce il punteggio da attribuire all'LTLeco, utile per l'assegnazione della classe di qualità secondo i limiti definiti nella seguente tabella.

Tabella 20: Limiti di classificazione dello stato trofico secondo il DLgs 152/06
Tab. 4.2.2/d - Limiti di classe in termini di LTL_{eco}

Classificazione stato	Limiti di classe	Limiti di classe in caso di trasparenza ridotta per cause naturali
Elevato	15	10
Buono	12-14	8-9
Sufficiente	< 12	<8

5.1.4 Caratterizzazione delle acque degli invasi

I risultati analitici relativi alla campagna sperimentale eseguita nel maggio 2013 sono riportati nelle tabelle seguenti.

Tabella 21: Caratteristiche chimico-fisiche delle acque nel lago di Castelnuovo

Lago Castelnuovo (Stazione 3)	Trasparenza	Clorofilla <i>a</i>	Temperatura	Conducibilità a 25°	Saturazione O ₂	O.D.	pH
metri	(m)	(µg/l)	(°C)	(µS/cm)	(%)	(mg/l O ₂)	
superficie	2.5	0.61	23.7	553	107	9.1	8.15
0.5	-	-	22.5	551	106	9.4	8.17
1	-	-	22.0	550	106	9.4	8.15
2	-	-	21.5	550	105	9.3	8.10
3	-	-	19.0	550	93	8.5	8.00
4	-	-	16.2	550	78	7.5	7.88
5	-	-	12.5	550	45	4.7	7.87
6	-	-	11.5	555	25	2.6	7.74
7	-	-	10.8	562	8	0.8	7.63

Tabella 22: Caratteristiche chimico-fisiche delle acque nel lago di Allori

Lago Allori (Stazione 2)	Trasparenza	Clorofilla <i>a</i>	Temperatura	Conducibilità a 25°	Saturazione O ₂	O.D.	pH
metri	(m)	(µg/l)	(°C)	(µS/cm)	(%)	(mg/l O ₂)	
superficie	5	0.73	23.7	825	106	9.0	7.85
0.5	-	-	23.7	826	106	9.0	7.85
1	-	-	21.5	822	106	9.3	7.83
2	-	-	20.5	841	105	9.4	7.73
3	-	-	15.7	896	99.5	9.8	7.56
4	-	-	11.0	965	80.5	7.8	7.57
5	-	-	9.0	996	58.5	5.7	7.54
6	-	-	8.3	1005	56.7	5.6	7.56
7	-	-	7.9	1008	54.4	5.4	7.48
8	-	-	7.8	1012	51.5	5.0	7.5

Tabella 23: Caratteristiche chimico fisiche dell'acqua nel lago di San Cipriano

Lago San Cipriano (Stazione 1)	Trasparenza	Clorofilla <i>a</i>	Temperatura	Conducibilità a 25°	Saturazione O ₂	O.D.	pH
metri	(m)	(µg/l)	(°C)	(µS/cm)	(%)	(mg/l O ₂)	
superficie	1.5	0.56	24.4	589	87	7.2	7.95
0.5	-	-	23.4	588	92.5	7.9	7.80
1	-	-	21.6	588	84	7.4	7.88
2	-	-	20.1	604	50	4.3	7.74
3	-	-	17.6	618	14	1.5	7.7
4 fondo	-	-	14.1	625	1	0.1	7.62

Tabella 24: Concentrazioni dei parametri chimico-fisici di base e dei "macrodescrittori" che vengono utilizzati per definire la qualità dell'acqua in un invaso il D.Lgs 152/99

Elemento o composto	u.d.m.	Lago Castelnuovo	Lago Allori	Lago S. Cipriano
Nitrati	mg/l N-NO ₃	0.637	0.602	0.298
Nitriti	mg/l N-NO ₂	0.090	0.076	0.072
Ammonio	mg/l N-NH ₄	<0.015	0.026	0.016
N-tot	mg/l N	<1	<1	<1
P-PO ₄	mg/l P	<0.05	<0.05	<0.05
P tot	mg/l P	<0.05	<0.05	<0.05
COD	mg/l O ₂	13.2	12.9	15
BOD ₅	mg/l O ₂	0.6	0.8	1.3
Cloruri	mg/l Cl	8.99	3.15	7.28
Durezza	mg/l CaCO ₃	149.1	210	155.7
Alcalinità	mg/l CaCO ₃	158.2	169.6	169.4
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	<1	2	2

Il giudizio sullo stato ecologico dei laghi, basato sui dati derivanti dal rilievo effettuato nel maggio 2013, è il seguente:

Tabella 25: Stato ambientale dei laghi di Castelnuovo, Allori e San Cipriano (al 2013)

Laghi	Stato ecologico dei laghi (DLgs 152/99)	Stato ambientale dei laghi (DLgs 152/99)	Punteggio relativo ai parametri (DLgs 152/06)	Classificazione stato (DLgs 152/99)
Castelnuovo	Classe 3	Sufficiente	9	Sufficiente
Allori	Classe 2	Buono	11	Sufficiente
San Cipriano	Classe 3	Sufficiente	9	Sufficiente

LEGENDA

Categoria	Trattamenti di potabilizzazione richiesti
A1	Trattamento fisico semplice e disinfezione
A2	Trattamento fisico e chimico normale e disinfezione
A3	Trattamento fisico e chimico spinto, affinazione e disinfezione

Sui campioni di acqua prelevati nei bacini sono stati inoltre determinati i parametri riportati nella tabella sottostante che, confrontati con i limiti di legge elencati nell'allegato I del D.M. Ambiente 260/2010, sono conformi allo standard di qualità delle acque superficiali, ad eccezione della concentrazione di mercurio nel lago S. Cipriano.

Tabella 26: Standard di qualità delle acque dei laghi

Elemento	u.d.m	Lago Castelnuovo	Lago Allori	Lago S. Cipriano	Concentrazione Limite SQA-MA D.M. 260/2010 (µg/l)	Concentrazione Limite SQA-CMA D.M. 260/2010 (µg/l)
Arsenico	µg/l	<1	<1	<1	10	-
Cadmio	µg/l	<0.1	0.221	0.322	0.15	0.9
Cromo tot	µg/l	1.11	1.7	2.2	7	-
Mercurio	µg/l	<0.1	<0.1	0.169	0.03	0.06
Nichel	µg/l	4.8	3.3	3.2	20	-
Piombo	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	7.2	-

SQA-MA: Standard di qualità ambientale espresso come valore medio annuo

SQA-CMA: Standard di qualità ambientale espresso come concentrazione massima ammissibile

Per maggiore completezza d'informazione, sono stati considerati anche i limiti di qualità previsti per la balneazione dal D.M. 30/03/2010 di applicazione della Direttiva 2006/7/CE, già recepita in Italia con il DLgs. 30 maggio 2008, n. 116.

Tabella 27: Analisi microbiologiche per la verifica della balneabilità del sito

UFC/100 ml	Lago Castelnuovo	Lago S. Cipriano	Lago Allori	D.M. 30/03/2010
<i>Escherichia coli</i>	<1	2	2	1000 UFC/100 ml
Enterococchi intestinali	900	22	255	500 UFC/ 100 ml

Le analisi microbiologiche svolte hanno messo in evidenza che i laghi S. Cipriano e Allori hanno caratteristiche idonee alla balneazione, mentre il lago Castelnuovo mostra valori di Enterococchi superiori ai limiti di legge. Tale concentrazione potrebbe essere influenzata dagli affluenti Pianale e Bacherozzolo, che mostrano anch'essi valori di Enterococchi superiori ai limiti previsti.

5.2 Descrizione del modello biochimico adottato per i bacini di Allori, Castelnuovo e San Cipriano

La qualità delle acque invasate nei laghi di Castelnuovo, di Allori e di San Cipriano è stata valutata utilizzando un modello matematico che, sulla base delle equazioni di bilancio di massa, noti gli apporti esterni e i tassi di decadimento, ha consentito di calcolare gli andamenti temporali di alcuni parametri chimici e microbiologici di particolare interesse, quali la concentrazione di **BOD₅**, di *Escherichia coli*, di **Enterococchi intestinali** e di **fosforo totale**.

E' importante notare che, indipendentemente dall'accuratezza della formulazione generale delle equazioni del modello, la grande variabilità dei valori di concentrazione nei corsi d'acqua immissari di un generico invaso rende questo tipo di previsione necessariamente approssimato, tale cioè da fornire solo una stima qualitativa dell'ordine di grandezza delle variabili in gioco e delle relative variazioni.

Il modello matematico utilizzato si basa sulle due equazioni di bilancio di massa della variabile chimica o microbiologica considerata e del volume liquido invasato nel lago.

Il modello è di tipo zero-dimensionale, cioè si basa sull'ipotesi che l'invaso risulti completamente rimescolato e la variabile concentrazione sia uniforme su tutto il volume.

L'equazione di bilancio di massa per la variabile m-esima è la seguente:

$$\boxed{d(C_m V)/dt = Q_{in} \cdot C_{m(in)} - Q_{out} \cdot C_m - k_m \cdot C_m \cdot V} \quad (1)$$

dove: C_m e $C_{m(in)}$ sono le concentrazioni nel lago e negli immissari,
 Q_{in} e Q_{out} sono le portate liquide in ingresso e uscita,
 k_m è la costante di decadimento della variabile m-esima, funzione della temperatura (i valori di k_m sono stati dedotti sulla base di formule approssimate reperibili nella letteratura scientifica),
 V è il volume del lago.

Per le diverse grandezze chimiche e biologiche indagate esse valgono:

- **BOD₅**

$k_m = c \cdot 1.047^{(T-20)}$	[1/d]	[EPRI, 1979]
dove $c = 0.18$ [1/d]	volendo simulare un decadimento basso	
$c = 0.86$ [1/d]	volendo simulare un decadimento alto	
- *Escherichia coli*

$k_m = 0.36 \cdot e^{-9000 \cdot (T-20)/(583 \cdot (273+T))}$	[1/d]	[Vismara, 1984]
---	-------	-----------------
- **Fosforo totale**

$k_m = 26/(h \cdot 365) \cdot 1.05^{(T-20)}$	[1/d]	[Lorentzen, 1976]
dove h [m] è la profondità media del bacino		

- *Enterococchi intestinali*

Per gli Enterococchi intestinali si è ritenuto di poter applicare la formula di decadimento dell'*Escherichia coli* mostrata in precedenza.

Il volume V di acqua invasata nel lago è funzione delle portate liquide di ingresso e d'uscita e del flusso evaporativo netto (tolte le precipitazioni) dalla superficie verso l'atmosfera (Evap):

$$\boxed{dV/dt = Q_{in} - Q_{out} - Evap} \quad (2)$$

Sviluppando, sostituendo e semplificando le equazioni (1) e (2) si ottengono due equazioni differenziali del prim'ordine nelle funzioni incognite $C_m(t)$ e $V(t)$:

$$\boxed{dC_m/dt = Q_{in}/V \cdot (C_{m(in)} - C_m) - k_m \cdot C_m - Evap/V \cdot C_m} \quad (3)$$

$$\boxed{dV/dt = Q_{in} - Q_{out} - Evap} \quad (4)$$

Poiché tutti i parametri che compaiono nel sistema sono funzioni del tempo, il sistema è risolvibile solo per via numerica, utilizzando uno dei metodi approssimati disponibili in letteratura.

Il metodo utilizzato dal modello per l'integrazione del sistema di equazioni (3) e (4) è quello di Eulero-Cauchy.

Esso fornisce, attraverso successive integrazioni con passo temporale di un giorno, i valori approssimati medi giornalieri di concentrazione m -esima e di volume invasato.

I dati di input per il modello sono le grandezze idrologiche significative per il bilancio di massa delle variabili che si vogliono modellare:

- INPUT portata dell'immissario
- INPUT concentrazione nell'immissario del parametro che si intende modellare
- INPUT temperatura dell'acqua del bacino
- INPUT portata dell'emissario
- INPUT portata evaporata
- INPUT geometria dell'invaso
- INPUT condizioni iniziali dei parametri.

L'output della simulazione è costituito dall'andamento temporale delle concentrazioni dei parametri chimici e igienico sanitari dei quali si è scelto di effettuare la modellazione (BOD₅ , fosforo totale, *Escherichia coli* e *Enterococchi intestinali*).

Le modellazioni di qualità dell'acqua dei laghi di Castelnuovo, di Allori e di San Cipriano sono state eseguite utilizzando i dati di output della modellazione termo-idrologica basata sul set di dati meteorologici relativi al periodo 01/09/1992 ÷ 31/12/2010.

Come precedentemente descritto, conservativamente si è ritenuto di procedere alla modellazione delle condizioni biochimiche dei due laghi utilizzando un set di dati di qualità dell'acqua in ingresso ai due laghi rappresentativo di condizioni medie.

La caratterizzazione chimica e igienico-sanitaria delle condizioni iniziali delle acque superficiali dei bacini imbriferi sottesi ai laghi di Castelnuovo, Allori e San Cipriano è stata

effettuata utilizzando i dati delle analisi effettuate sulle acque di tutti i corpi idrici affluenti ai due invasi nel corso della completa campagna di caratterizzazione eseguita nel mese di maggio 2013.

Per i due corpi idrici oggetto delle successive previsioni modellistiche sono stati utilizzati, quali dati di input per la modellazione, la media dei valori delle concentrazioni dei singoli affluenti (borri Valli, Percussente, Bicchieraie, Pianale e Bacherozzolo per il lago Castelnuovo; borri Sinciano, Campocigoli, Molinuzzo, e Pago per il lago Allori; borri Frati e Meleto per il lago di San Cipriano) in modo tale da ottenere un unico valore di concentrazione in ingresso per i quattro parametri modellati (BOD_5 [mg/l], Fosforo totale [mg/l], *Escherichia coli* [UFC/100 ml] e Enterococchi intestinali [UFC/100 ml]). Poiché i valori di portata dei singoli affluenti sono risultati, nel corso dei rilievi di maggio 2013, molto contenuti e comunque tra loro paragonabili, l'approccio indicato risulta cautelativamente corretto anche dal punto di vista quantitativo.

5.3 Modellazione del bilancio biochimico del lago di Castelnuovo

5.3.1 *Dati di input utilizzati*

Il modello previsionale di qualità delle acque del lago di Castelnuovo è stato applicato sullo schema idrico ipotizzato utilizzando come dati di input i valori delle portate dell'immissario, dell'emissario e di evaporazione dall'invaso ottenute dalla simulazione del modello termo-idrologico in condizioni idrologiche medie.

Le concentrazioni dei parametri chimici e igienico-sanitari delle acque affluenti al lago sono ricavate mediando i dati di qualità dell'acqua degli immissari al bacino come descritto (dati delle misure di maggio 2013), sulla base delle quali sono stati ricavati valori medi annui di concentrazione:

Tabella 28: Concentrazioni in ingresso nel lago di Castelnuovo

parametro	concentrazione media annua
BOD_5	1.66 mg/l
fosforo totale	0.0922 mg/l
<i>Escherichia coli</i>	5321 UFC /100 ml
<i>Enterococchi intestinali</i>	4495 UFC /100 ml

Inoltre sono stati assunti, all'interno del lago, i valori iniziali di concentrazione di seguito riportati.

Tabella 29: Concentrazioni iniziali nel lago di Castelnuovo

parametro	valori iniziali
BOD_5	0.6 mg/l
fosforo totale	0.05 mg/l
<i>Escherichia coli</i>	1 UFC /100 ml
<i>Enterococchi intestinali</i>	900 UFC /100 ml

5.3.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico chimico-biologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Castelnuovo sotto il profilo delle variazioni di concentrazione del BOD₅, del fosforo totale, della presenza di *Escherichia coli* e di Enterococchi intestinali nelle condizioni ipotizzate.

Nelle fig. 47-51 sono illustrati gli andamenti temporali modellati per questi parametri e nella tabella 30 sono riportate le relative medie mensili.

Lago di Castelnuovo - BOD₅ (decadimento minimo) 1992-2010

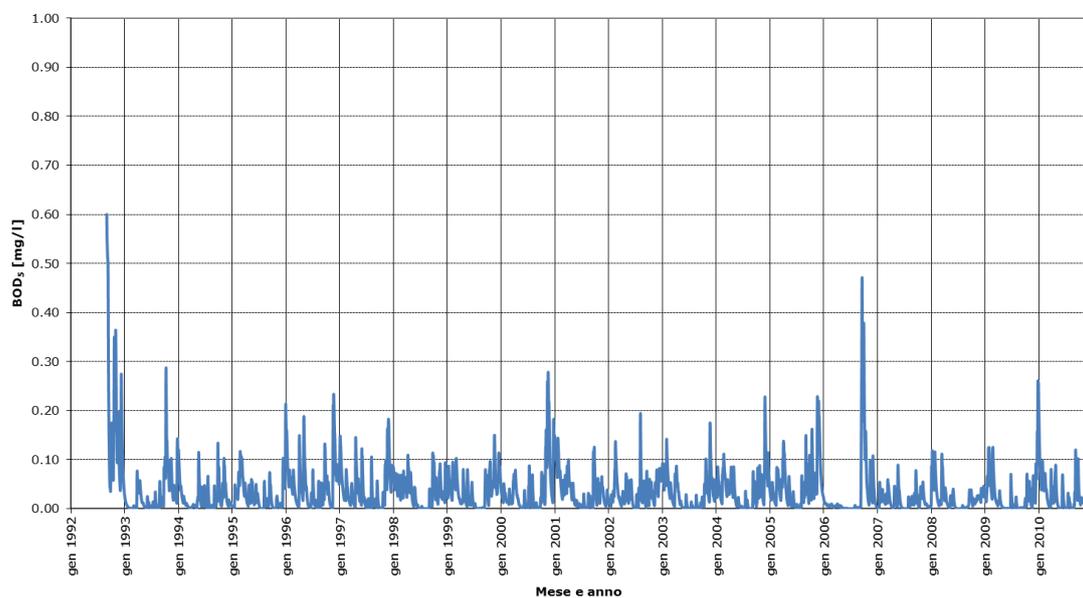


Figura 47: Lago di Castelnuovo; BOD₅ (decadimento minimo) 1992-2010

Lago di Castelnuovo - BOD₅ (decadimento massimo) 1992-2010

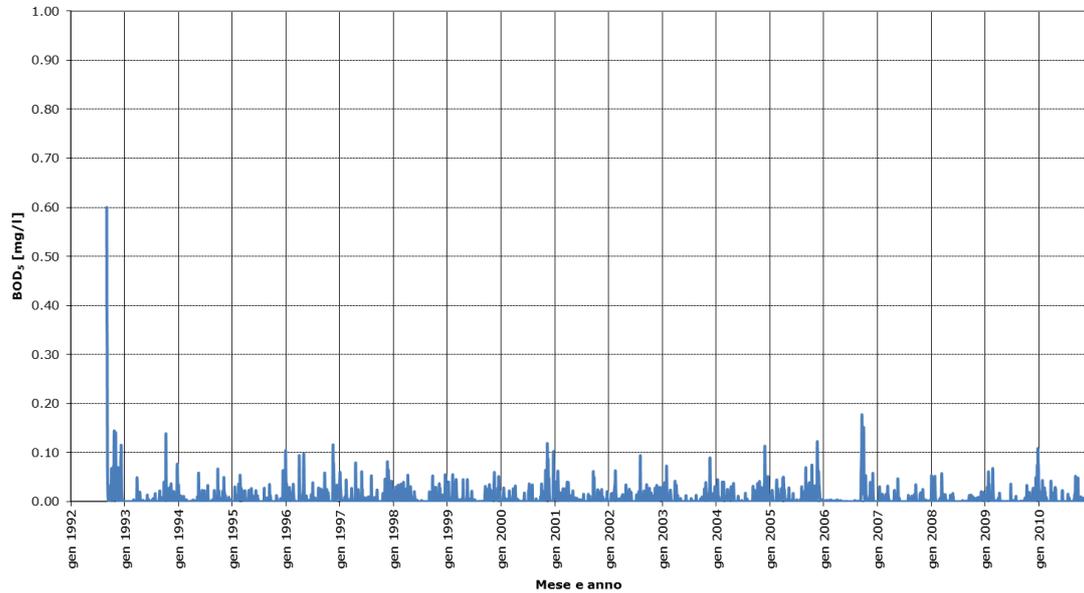


Figura 48: Lago di Castelnuovo; BOD₅ (decadimento massimo) 1992-2010

Lago di Castelnuovo - Fosforo totale 1992-2010

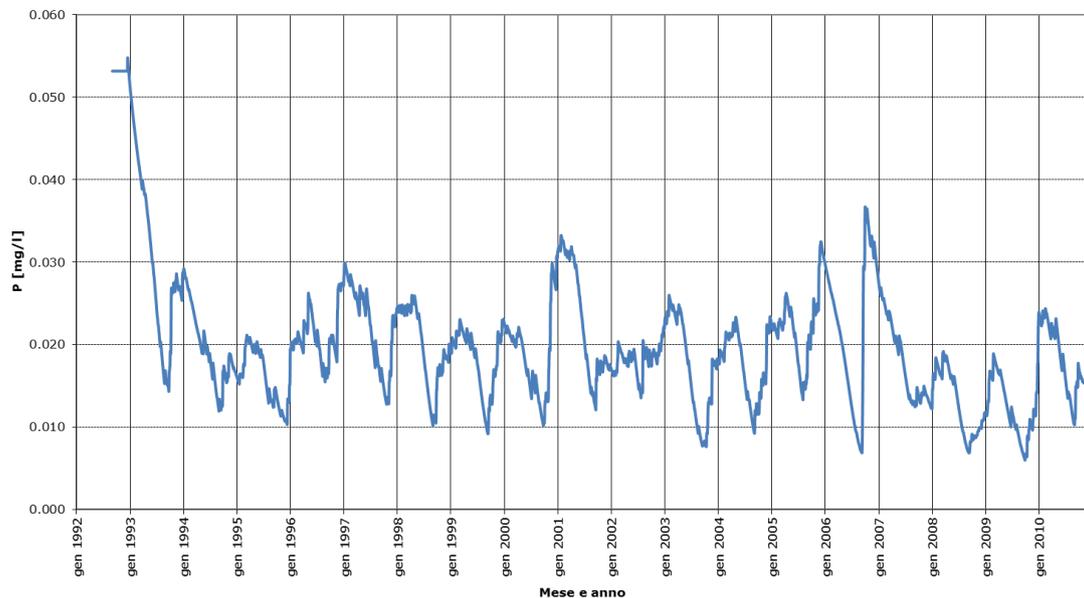


Figura 49: Lago di Castelnuovo; Fosforo totale 1992-2010

Lago di Castelnuovo - Escherichia Coli 1992-2010

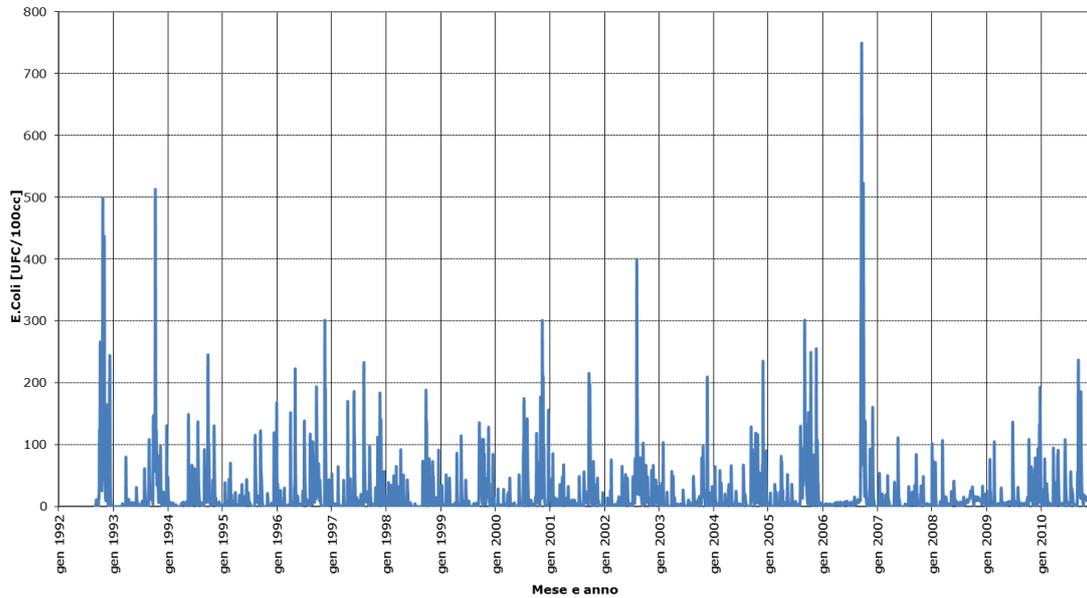


Figura 50: Lago di Castelnuovo; *Escherichia coli* 1992-2010

Lago di Castelnuovo - Enterococchi intestinali 1992-2010

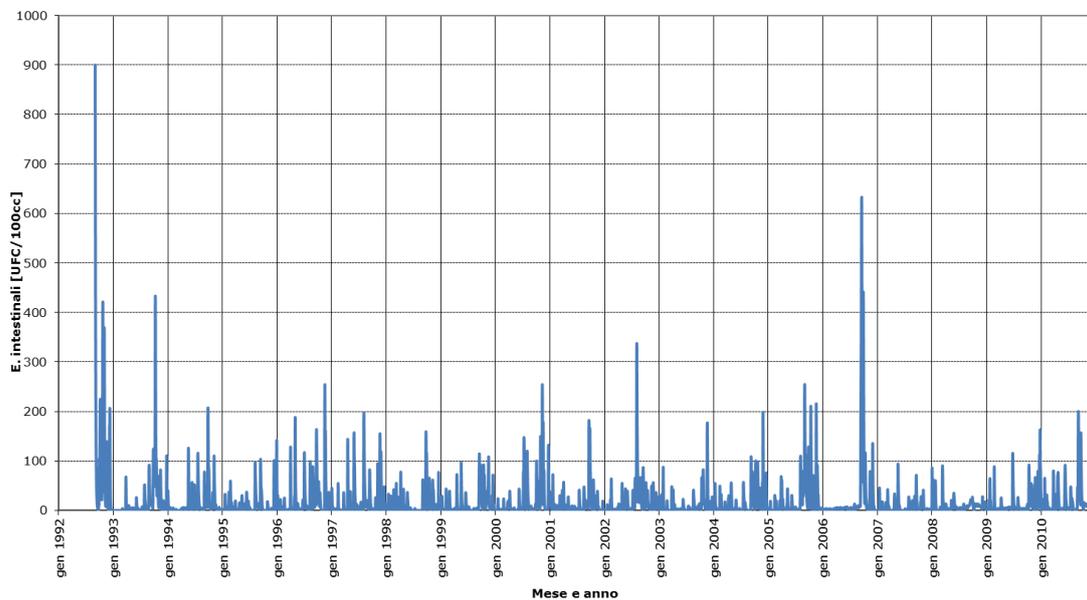


Figura 51: Lago di Castelnuovo; Enterococchi intestinali 1992-2010.

Tabella 30: Risultati della modellazione della qualità dell'acqua del bacino di Castelnuovo (valori medi mensili)

	BOD₅ min	BOD₅ max	Fosforo	E. coli	E.intestinali
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[UFC/100 ml]	[UFC/100 ml]
Gennaio	0.028	0.007	0.019	56.613	47.831
Febbraio	0.021	0.004	0.024	7.418	6.267
Marzo	0.016	0.003	0.024	6.063	5.122
Aprile	0.019	0.004	0.023	10.731	9.065
Maggio	0.013	0.004	0.024	7.357	6.215
Giugno	0.007	0.001	0.019	10.725	9.060
Luglio	0.004	0.001	0.016	10.938	9.240
Agosto	0.007	0.002	0.014	19.917	16.825
Settembre	0.034	0.010	0.017	39.718	38.930
Ottobre	0.031	0.006	0.020	45.664	38.576
Novembre	0.033	0.008	0.021	32.282	27.271
Dicembre	0.033	0.007	0.023	17.829	15.061
Media annua	0.020	0.005	0.020	22.105	19.122

Nelle condizioni ipotizzate, all'interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.020 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.014 e 0.024 mg/l (media annua di circa 0.02 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 6.063 e 56.613 UFC/100 ml (media annua intorno a 22.105 UFC/100 ml) e quella degli Enterococchi intestinali tra 5.122 e 47.831 UFC/100 ml (media annua di circa 19.122 UFC/100 ml).

Confrontando questi valori con quelli riportati nella tabella 28, la permanenza nell'invaso si traduce (come del resto avviene di norma in questi casi) generalmente in un miglioramento della qualità dell'acqua rispetto a quella dell'affluente.

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'ittiofauna, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono ampiamente entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli (che non fissa valori di riferimento per *Escherichia coli*).

Tabella 31: Limiti previsti per BOD₅ e Fosforo totale nelle acque dolci superficiali dal DLgs n° 152/06 ai fini della tutela della fauna ittica

Parametro	Unità di misura	Acque per Salmonidi		Acque per Ciprinidi	
		Guida	Imperativo	Guida	Imperativo
BOD ₅	mg/l	3	5	6	9
Fosforo totale	mg/l P	0.07	Limite non previsto	0.14	Limite non previsto
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	Limite non previsto	Limite non previsto	Limite non previsto	Limite non previsto

In caso di prelievo a scopo idropotabile, il DLgs n° 152/06 stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della qualità dell'acqua del corpo idrico considerato (vedi tabella 32).

Tabella 32: Limiti previsti per i parametri selezionati dal DLgs n° 152/06 per le varie categorie di qualità dell'acqua da avviare a potabilizzazione

Parametro	Unità di misura	Categoria A1		Categoria A2		Categoria A3	
		Guida	Imperativo	Guida	Imperativo	Guida	Imperativo
BOD ₅	mg/l	< 3	Limite non previsto	< 5	Limite non previsto	< 7	Limite non previsto
Fosforo totale	mg/l P	Limite non previsto					
<i>Escherichia coli</i> *	UFC/100 ml	20	Limite non previsto	2000	Limite non previsto	20000	Limite non previsto
<i>Enterococchi intestinali</i> **	UFC/100 ml	20	Limite non previsto	1000	Limite non previsto	10000	Limite non previsto

* i limiti considerati fanno riferimento a quelli previsti dal decreto per i coliformi fecali

** i limiti considerati fanno riferimento a quelli previsti dal decreto per gli streptococchi fecali

LEGENDA

Categoria	Trattamenti di potabilizzazione richiesti
A1	Trattamento fisico semplice e disinfezione
A2	Trattamento fisico e chimico normale e disinfezione
A3	Trattamento fisico e chimico spinto, affinazione e disinfezione

I valori calcolati dal modello, confrontati con i limiti di tale decreto (che non prevede vincoli per il fosforo totale), indicano che l'impiego idropotabile dell'acqua del lago è possibile. I dati forniti dalla simulazione matematica collocano il bacino nella Classe A2, che richiede un trattamento consistente in filtrazione e clorazione, prima della distribuzione al consumo umano.

In riferimento ai limiti di qualità previsti per la balneazione dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti indicano che l'invaso avrà caratteristiche idonee alla balneazione.

In conclusione, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e origina un corpo idrico che può fornire svariate possibilità d'uso, tra cui, in particolare, il mantenimento di un popolamento ittico a salmonidi, il prelievo idropotabile (previo trattamento) e la balneabilità.

5.4 Modellazione del bilancio biochimico del lago di Allori

5.4.1 *Dati di input utilizzati*

Il modello previsionale di qualità delle acque del lago di Allori è stato applicato sullo schema idrico ipotizzato utilizzando come dati di input i valori delle portate dell'immissario, dell'emissario e di evaporazione dall'invaso ottenute dalla simulazione del modello termo-idrologico in condizioni idrologiche medie.

Le concentrazioni dei parametri chimici e igienico-sanitari delle acque affluenti al lago sono ricavate mediando i dati di qualità dell'acqua degli immissari al bacino come descritto (misure di maggio 2013), sulla base delle quali sono stati ricavati valori medi annui di concentrazione:

Tabella 33: Concentrazioni in ingresso nel lago di Allori

parametro	concentrazione media annua
BOD ₅	0.825 mg/l
fosforo totale	0.05 mg/l
<i>Escherichia coli</i>	447.75 UFC /100 ml
<i>Enterococchi intestinali</i>	1137.25 UFC /100 ml

Inoltre sono stati assunti, all'interno del lago, i valori iniziali di concentrazione di seguito riportati:

Tabella 34: Concentrazioni iniziali nel lago di Allori

parametro	valori iniziali
BOD ₅	0.8 mg/l
fosforo totale	0.05 mg/l
<i>Escherichia coli</i>	2 UFC /100 ml
<i>Enterococchi intestinali</i>	255 UFC /100 ml

5.4.2 *Risultati della modellazione*

Le simulazioni effettuate con il modello matematico chimico-biologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Allori sotto il profilo delle variazioni di concentrazione del BOD₅, del fosforo totale, della presenza di *Escherichia coli* e di *Enterococchi intestinali* nelle condizioni ipotizzate.

Nelle fig. 52-56 sono illustrati gli andamenti temporali previsti per questi parametri (valori medi giornalieri) e nella tabella 35 sono riportate le relative medie mensili.

Lago di Allori - BOD₅ (decadimento minimo) 1992-2010

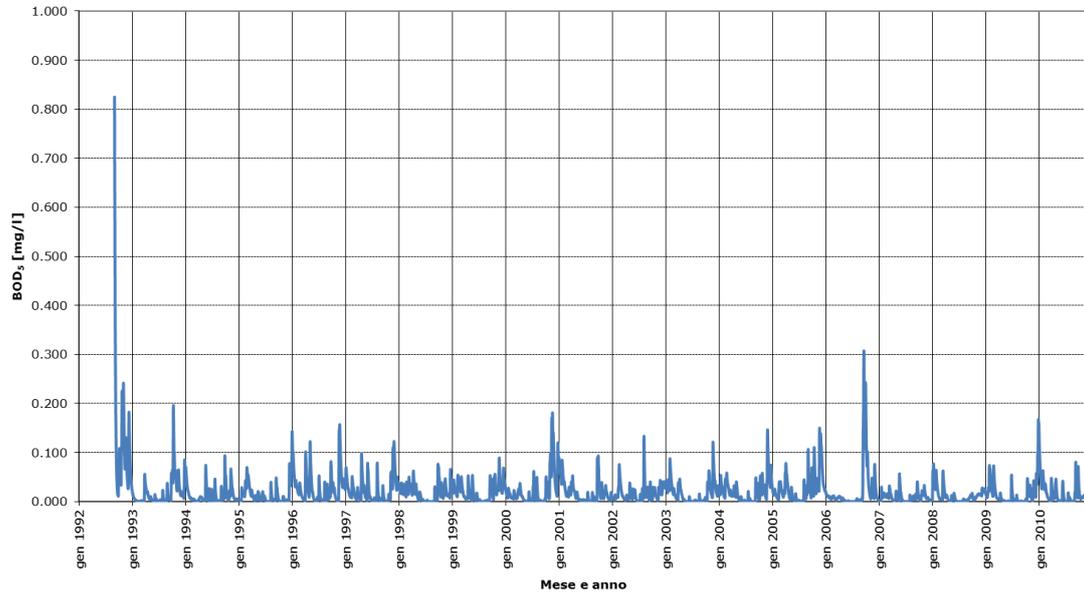


Figura 52: Lago di Allori; BOD₅ (decadimento minimo) 1992-2010

Lago di Allori - BOD₅ (decadimento massimo) 1992-2010

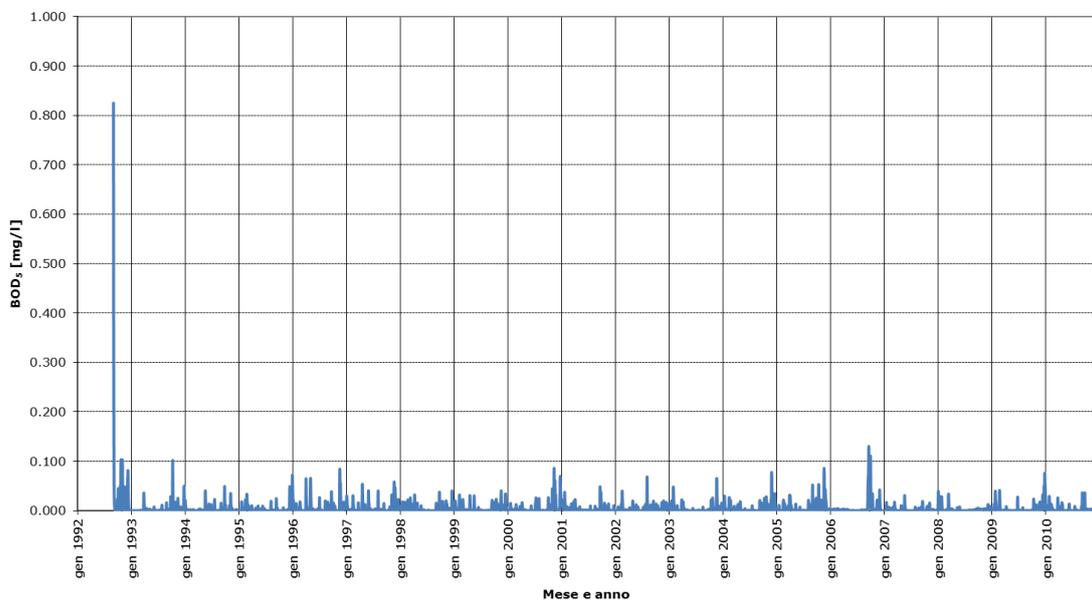


Figura 53: Lago di Allori; BOD₅ (decadimento massimo) 1992-2010

Lago di Allori - Fosforo totale 1992-2010

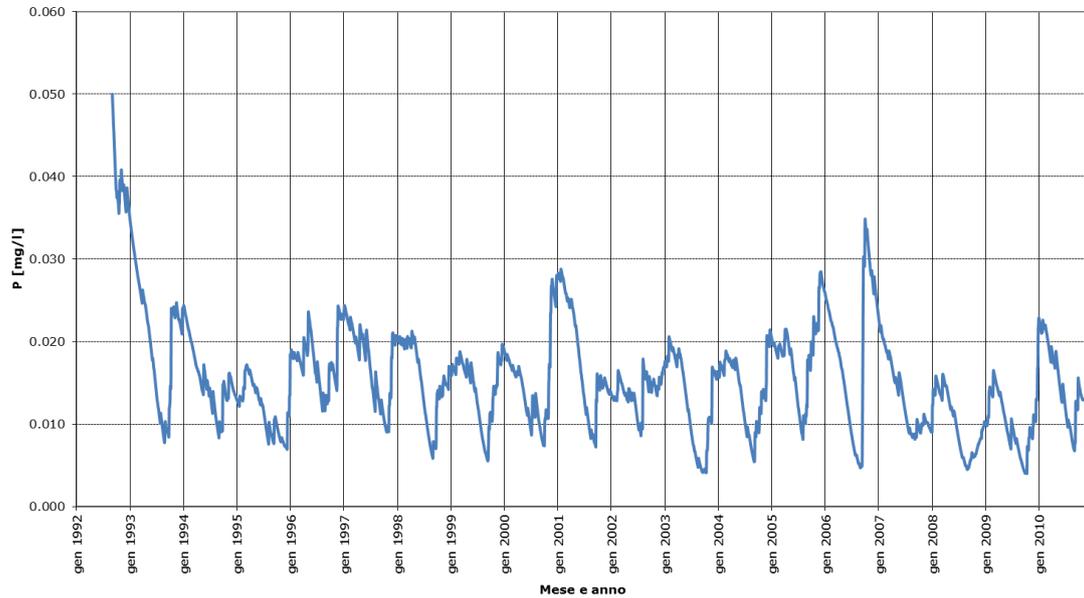


Figura 54: Lago di Allori; Fosforo totale 1992-2010

Lago di Allori - Escherichia Coli 1992-2010

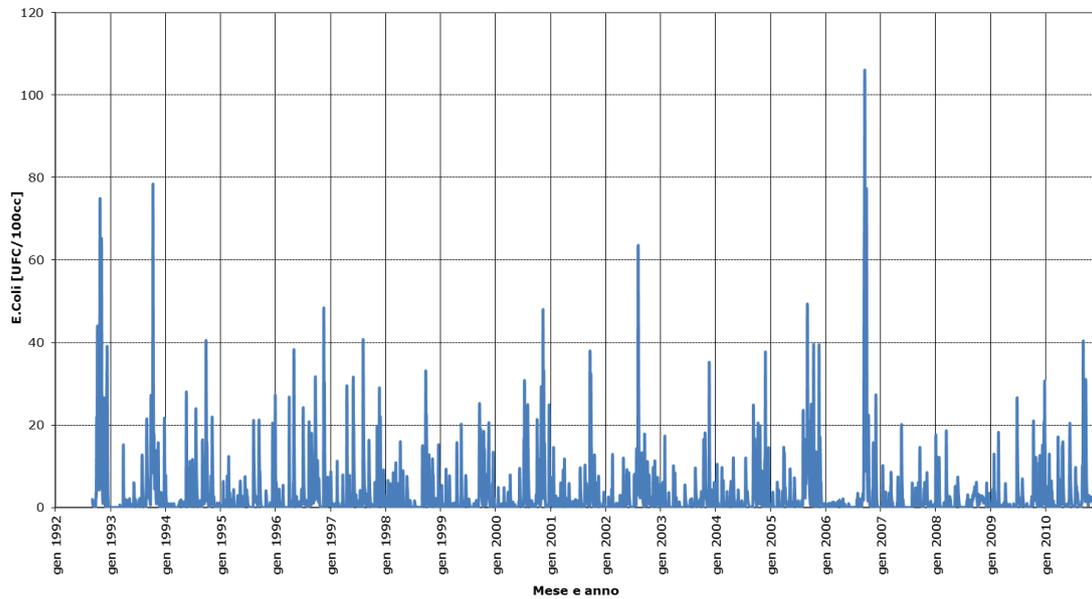


Figura 55: Lago di Allori; Escherichia coli 1992-2010

Lago di Allori - Enterococchi intestinali 1992-2010

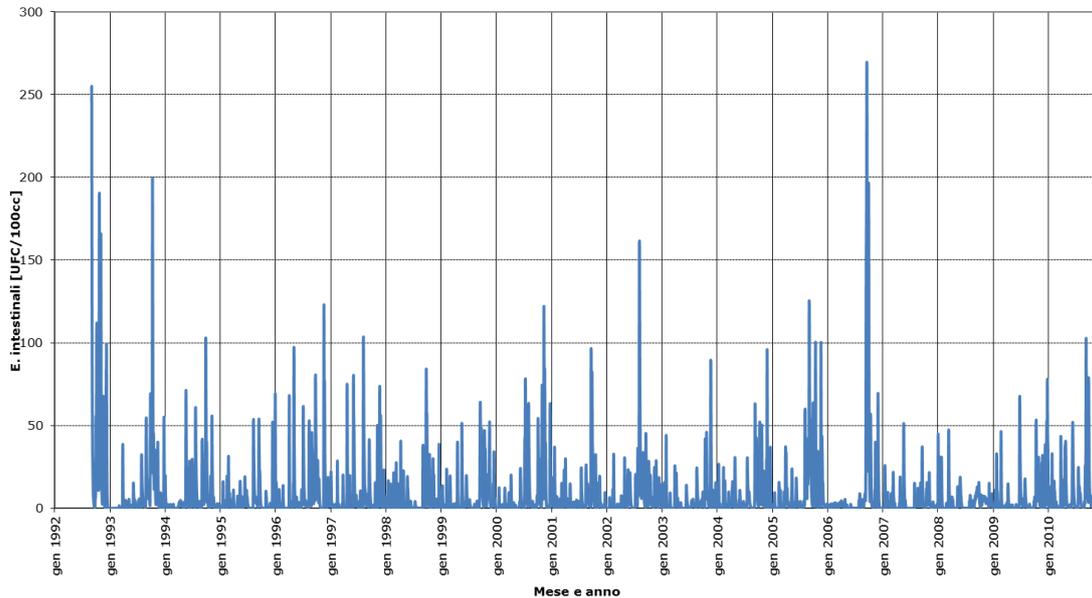


Figura 56: Lago di Allori; Enterococchi intestinali 1992-2010.

Tabella 35: Risultati della modellazione della qualità dell'acqua del bacino di Allori (medie mensili)

	BOD min	BOD max	Fosforo	E coli	E.intestinali
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[UFC/100 ml]	[UFC/100 ml]
Gennaio	0.030	0.008	0.014	8.996	22.867
Febbraio	0.023	0.005	0.019	1.280	3.254
Marzo	0.017	0.003	0.019	1.058	2.689
Aprile	0.019	0.004	0.018	1.909	4.851
Maggio	0.012	0.005	0.019	1.228	3.122
Giugno	0.007	0.001	0.014	1.879	4.774
Luglio	0.004	0.001	0.011	1.946	4.947
Agosto	0.007	0.002	0.009	3.494	8.881
Settembre	0.026	0.008	0.011	6.679	18.472
Ottobre	0.032	0.007	0.015	7.176	18.238
Novembre	0.034	0.008	0.016	5.119	13.011
Dicembre	0.035	0.007	0.018	2.812	7.148
Media annua	0.021	0.005	0.015	3.631	9.355

Nelle condizioni ipotizzate, all'interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.021 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.009 mg/l e 0.019 mg/l (media annua pari a 0.015 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 1.058 e 8.996 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.631 UFC/100 ml) e quella di Enterococchi intestinali tra 2.689 e 22.867 UFC/100 ml (media annua intorno a 9.355 UFC/100 ml).

Confrontando questi valori con quelli riportati in tabella 33, la permanenza nell'invaso si traduce (come del resto avviene di norma in questi casi) generalmente in un miglioramento della qualità dell'acqua rispetto a quella dell'affluente.

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'ittiofauna, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli (che non fissa valori di riferimento per *Escherichia coli*).

In caso di prelievo a scopo idropotabile, il DLgs n° 152/06 stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della qualità dell'acqua del corpo idrico considerato (vedi tabella 32 precedente). I valori calcolati dal modello, confrontati con i limiti di tale decreto (che non prevede vincoli per il fosforo totale), indicano che l'impiego idropotabile dell'acqua del lago è possibile. I dati forniti dalla simulazione matematica collocano il bacino nella categoria A1, che richiede un trattamento consistente in filtrazione e clorazione, prima della distribuzione al consumo umano.

In riferimento ai limiti di qualità previsti per la balneazione dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti indicano che l'invaso avrà caratteristiche idonee alla balneazione.

In conclusione, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino di Allori induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e origina un corpo idrico che può fornire svariate possibilità d'uso, tra cui, in particolare, il mantenimento di un popolamento ittico a salmonidi, il prelievo idropotabile (previo trattamento) e attività ricreative.

5.5 Modellazione del bilancio biochimico del lago di San Cipriano

5.5.1 *Dati di input utilizzati*

Il modello previsionale di qualità delle acque del lago di San Cipriano è stato applicato sullo schema idrico ipotizzato utilizzando come dati di input i valori delle portate dell'immissario, dell'emissario e di evaporazione dall'invaso ottenute dalla simulazione del modello termo-idrologico in condizioni idrologiche medie.

Le concentrazioni dei parametri chimici e igienico sanitari delle acque affluenti al lago sono ricavate mediando i dati di qualità dell'acqua degli immissari al bacino come descritto (misure del maggio 2013), sulla base delle quali sono stati ricavati valori medi annui di concentrazione:

Tabella 36: Concentrazioni in ingresso nel lago di San Cipriano

parametro	concentrazione media annua
BOD ₅	0.6 mg/l
fosforo totale	0.05 mg/l
<i>Escherichia coli</i>	45 UFC /100 ml
Enterococchi intestinali	187.5 UFC /100 ml

Inoltre sono stati assunti, all'interno del lago, i valori iniziali di concentrazione di seguito riportati.

Tabella 37: Concentrazioni iniziali nel lago di San Cipriano

parametro	valori iniziali
BOD ₅	1.3 mg/l
fosforo totale	0.05 mg/l
<i>Escherichia coli</i>	2 UFC /100 ml
Enterococchi intestinali	22 UFC /100 ml

5.5.2 *Risultati della modellazione*

Le simulazioni effettuate con il modello matematico chimico-biologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di San Cipriano sotto il profilo delle variazioni di concentrazione del BOD₅, del fosforo totale, della presenza di *Escherichia coli* e di Enterococchi intestinali nelle condizioni ipotizzate.

Nelle fig. 57-61 sono illustrati gli andamenti temporali modellati per questi parametri e nella tabella 38 sono riportate le relative medie mensili.

Lago di San Cipriano - BOD₅ (decadimento minimo) 1992-2010

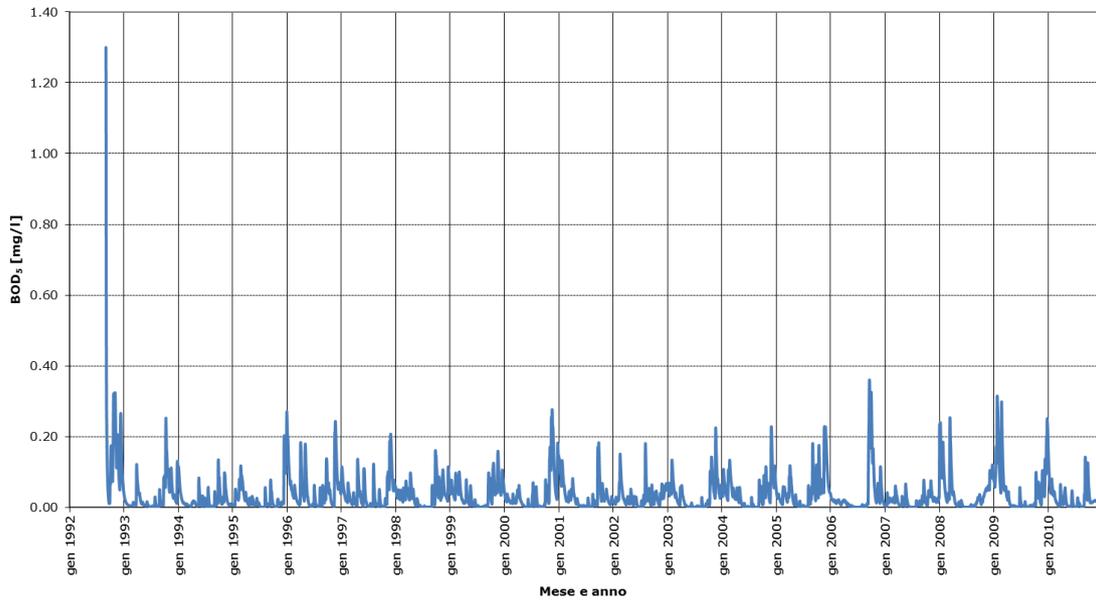


Figura 57: Lago di San Cipriano; BOD₅ (decadimento minimo) 1992-2010

Lago di San Cipriano - BOD₅ (decadimento massimo) 1992-2010

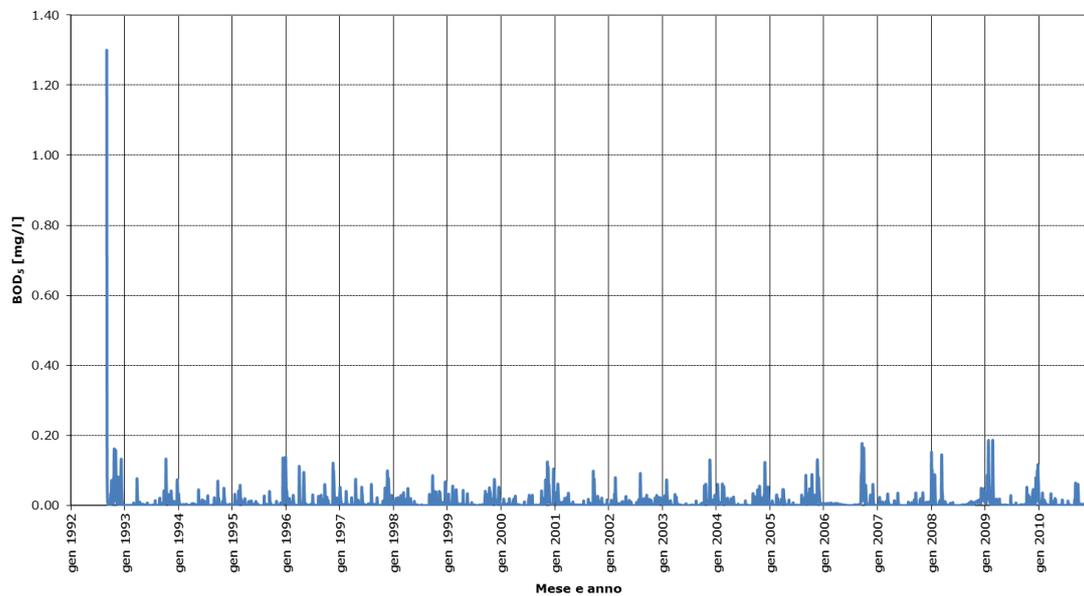


Figura 58: Lago di San Cipriano; BOD₅ (decadimento massimo) 1992-2010

Lago di San Cipriano - Fosforo totale 1992-2010

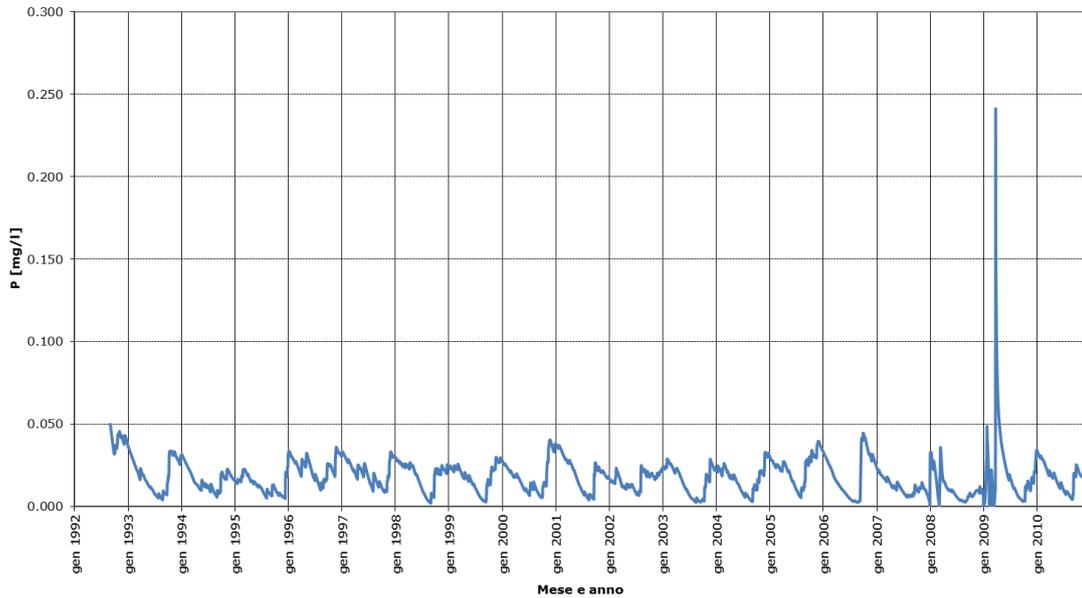


Figura 59: Lago di San Cipriano; Fosforo totale 1992-2010

Lago di San Cipriano - Escherichia Coli 1992-2010

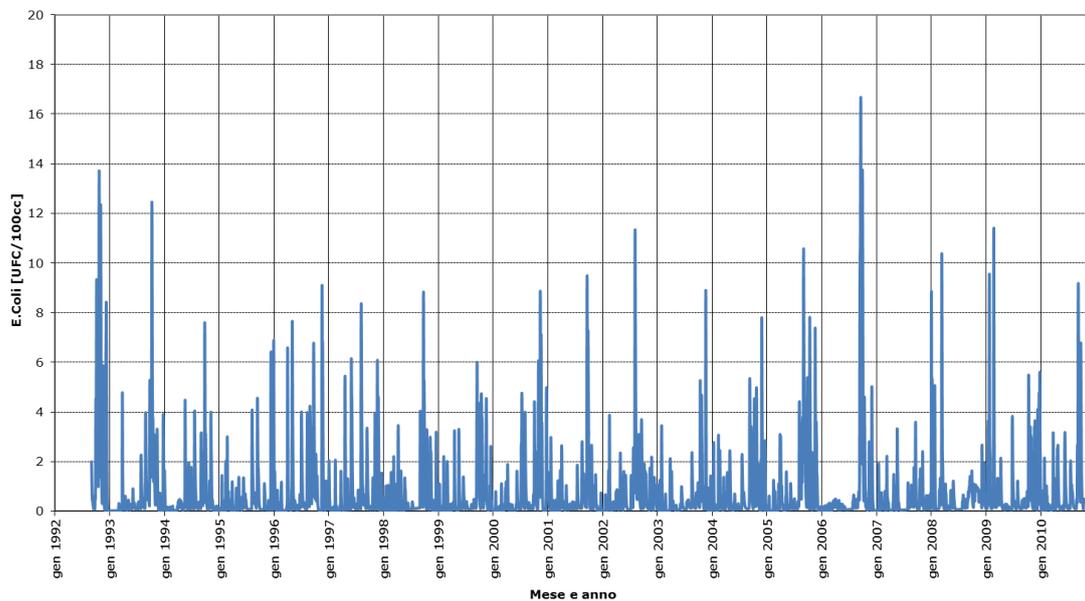


Figura 60: Lago di San Cipriano; Escherichia coli 1992-2010

Lago di San Cipriano - Enterococchi intestinali 1992-2010

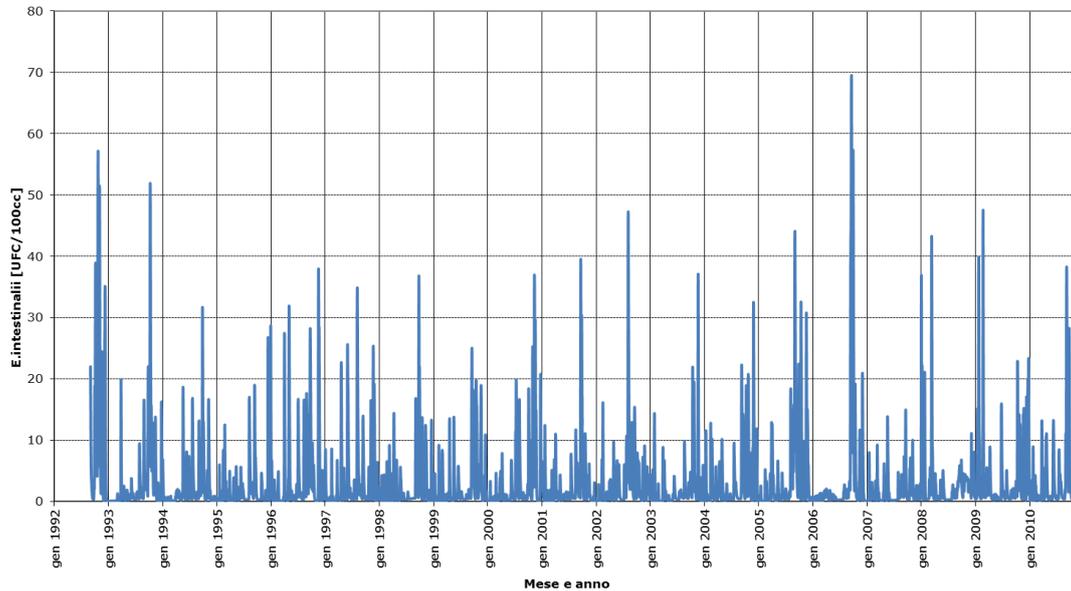


Figura 61: Lago di San Cipriano; Enterococchi intestinali 1992-2010.

Tabella 38: Risultati della modellazione della qualità dell'acqua del bacino di San Cipriano (valori medi mensili)

	BOD min	BOD max	Fosforo	E coli	E.intestinali
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[UFC/100 ml]	[UFC/100 ml]
Gennaio	0.061	0.015	0.018	1.951	8.130
Febbraio	0.047	0.011	0.024	0.385	1.605
Marzo	0.038	0.008	0.021	0.426	1.776
Aprile	0.034	0.007	0.023	0.514	2.140
Maggio	0.018	0.011	0.025	0.381	1.589
Giugno	0.009	0.002	0.014	0.381	1.588
Luglio	0.006	0.001	0.009	0.389	1.619
Agosto	0.012	0.003	0.008	0.758	3.160
Settembre	0.037	0.011	0.012	1.509	6.371
Ottobre	0.059	0.014	0.019	1.629	6.786
Novembre	0.064	0.017	0.022	1.218	5.075
Dicembre	0.068	0.016	0.025	0.709	2.955
Media annua	0.038	0.010	0.018	0.854	3.566

Nelle condizioni ipotizzate, all'interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.038 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.008 e 0.025 mg/l (media annua di circa 0.018 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 0.381 e 1.951 UFC/100 ml (media annua intorno a 0.854 UFC/100 ml) e quella di *Enterococchi intestinali* tra 1.588 e 8.130 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.566 UFC/100 ml).

Confrontando questi valori con quelli riportati nella tabella 36, la permanenza nell'invaso si traduce (come del resto avviene di norma in questi casi) generalmente in un miglioramento della qualità dell'acqua rispetto a quella dell'affluente.

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'ittiofauna, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli (che non fissa valori di riferimento per *Escherichia coli*).

In caso di prelievo a scopo idropotabile, il DLgs n° 152/06 stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della qualità dell'acqua del corpo idrico considerato (vedi tabella 32 precedente). I valori calcolati dal modello, confrontati con i limiti di tale decreto (che non prevede vincoli per il fosforo totale), indicano che l'impiego idropotabile dell'acqua del lago è possibile. I dati forniti dalla simulazione matematica collocano il bacino nella categoria A1, che richiede un trattamento consistente in filtrazione e clorazione, prima della distribuzione al consumo umano.

In riferimento ai limiti di qualità previsti per la balneazione dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti indicano che l'invaso avrà caratteristiche idonee alla balneazione.

In conclusione, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino di San Cipriano induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e origina un corpo idrico che può fornire svariate possibilità d'uso, tra cui, in particolare, il mantenimento di un popolamento ittico a salmonidi, il prelievo idropotabile (previo trattamento) e attività ricreative.

6 CONCLUSIONI

Enel Produzione SpA, nell'ambito progetto di recupero ambientale della miniera di S. Barbara, secondo quanto previsto dal Decreto attuativo della Regione Toscana n.416 del 09 febbraio 2010, ha incaricato CESI SpA di eseguire un'estensione dell'analisi modellistica e dei bilanci idrico e biochimico dei laghi Allori, Castelnuovo e San Cipriano.

L'analisi del bilancio idrico è stata eseguita modellando l'idrologia dei laghi di Allori (che tramite il suo emissario, il borro Meleto, rilascerà acqua verso San Cipriano), di San Cipriano e Castelnuovo utilizzando un ampio e rappresentativo set di dati meteorologici di input (18 anni, dal settembre 1992 al dicembre 2010).

I risultati emersi dalla modellazione mostrano che la temperatura dell'acqua tende a seguire un trend stagionale, così come l'evaporazione netta che risulta ovviamente più elevata durante i mesi estivi.

Il livello del lago di San Cipriano presenta un trend ciclico nel quale, durante i mesi estivi (in particolare a luglio e a settembre), si ha un abbassamento sia per le minori precipitazioni sia per il divieto di prelievi di portate dall'Arno; nei mesi autunnali si verifica invece un significativo aumento del livello dovuto alle maggiori piogge, come è ben evidente nella rappresentazione di deficit e surplus mensili (fig. 32). Inoltre durante i mesi primaverili, da aprile a giugno, il livello sale anche per effetto dei reintegri tramite le portate prelevate dall'Arno allo scopo di disporre al 1 luglio dell'invaso con quota pari alla massima regolazione (come previsto dal disciplinare di regolamentazione).

Il lago di Castelnuovo ha limitate possibilità di diminuire il livello d'invaso, dal momento che riceve in ingresso dal lago di Allori una portata di 40 l/s turbinata da un mini impianto idroelettrico che risulta superiore al rilascio di 12 l/s verso il corpo idrico ricettore.

Per quanto riguarda invece il lago di Allori il suo livello segue un trend ciclico con discreti abbassamenti durante i mesi estivi dovuti alle minori piogge oltre che alle portate turbinate verso il bacino di Castelnuovo.

I risultati della modellazione delle caratteristiche idrologiche dei laghi hanno permesso di valutarne anche il tempo di ricambio o di permanenza.

Dall'analisi effettuata si può ritenere che in condizioni idrologiche medie:

- il lago di San Cipriano avrebbe un tempo di ricambio di circa 4 mesi;
- il lago di Allori avrebbe un tempo di ricambio di circa 12 mesi;
- il lago di Castelnuovo avrebbe un tempo di ricambio di circa 21 mesi.

Per quanto riguarda la modellazione biochimica delle acque degli invasi, all'interno del bacino di S. Cipriano si avrebbero valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.038 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.008 e 0.025 mg/l (media annua di circa 0.018 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 0.381 e 1.951 UFC/100 ml (media annua intorno a 0.854 UFC/100 ml) e quella di Enterococchi intestinali tra 1.588 e 8.130 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.566 UFC/100 ml).

Nel bacino di Castelnuovo il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.020 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica

colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.014 e 0.024 mg/l (media annua di circa 0.02 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 6.063 e 56.613 UFC/100 ml (media annua intorno a 22.105 UFC/100 ml) e quella degli Enterococchi intestinali tra 5.122 e 47.831 UFC/100 ml (media annua di circa 19.122 UFC/100 ml).

Anche per quanto riguarda il bacino di Allori il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.021 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.009 e 0.019 mg/l (media annua di circa 0.015 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 1.058 e 8.996 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.631 UFC/100 ml) e quella di Enterococchi intestinali tra 2.689 e 22.867 UFC/100 ml (media annua intorno a 9.355 UFC/100 ml).

Alla luce di quanto indicato la permanenza negli invasi si traduce (come del resto avviene di norma in questi casi) in un miglioramento della qualità dell'acqua rispetto a quella dell'affluente anche se lo stato ambientale dei borri presi in considerazione come immissari risulta comunque sempre elevato (come emerge dai rilievi in campo eseguiti), con l'eccezione del borro Pianale.

Dal punto di vista della tutela della fauna ittica, la maggior parte dei parametri analizzati, che risultano in linea con i limiti di qualità previsti dal DLgs 152/06 e ss.mm.ii. per le acque salmonicole, vengono confermati anche dai risultati della modellazione: infatti i valori dei parametri forniti dal modello ricadono ampiamente entro i limiti previsti per i corpi idrici salmonicoli.

In caso di prelievo a scopo idropotabile, dal confronto con i valori della normativa vigente risulta che l'impiego idropotabile dell'acqua del lago di Castelnuovo sarebbe possibile previo un trattamento fisico e chimico normale e disinfezione, prima della distribuzione al consumo umano (acque di categoria A2), mentre l'uso idropotabile dell'acqua del lago di Allori e del lago di S. Cipriano sarebbe possibile previo un trattamento consistente in filtrazione e disinfezione, prima della distribuzione al consumo umano (acque di categoria A1).

In riferimento ai limiti di qualità previsti per la balneazione dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti indicano che gli invasi di Allori e San Cipriano hanno caratteristiche idonee alla balneazione. Relativamente al lago di Castelnuovo, si prevede che la situazione tenderà a un progressivo miglioramento che porterà a condizioni idonee alla balneazione in quanto gli afflussi in arrivo dal bacino imbrifero, la cui qualità è prevista migliorare per effetto dell'intercettazione dei collettori fognari, si diluiranno ulteriormente con le acque del bacino.

In conclusione, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che il transito delle acque degli affluenti nei laghi indurrebbe un miglioramento della qualità e originerebbe corpi idrici che potrebbero fornire svariate possibilità d'uso, tra cui, in particolare, il mantenimento di un popolamento ittico a salmonidi, il prelievo idropotabile (previo trattamento) e l'uso per svariate attività ricreative.

Vista l'idrologia complessiva dell'area, la morfologia degli invasi e le caratteristiche qualitative delle acque affluenti ai bacini di Allori, S. Cipriano e Castelnuovo, l'analisi

complessiva dei risultati ha consentito di verificare l'assenza di specifiche problematiche di peggioramento della qualità dell'acqua.

Viste le portate in ingresso ai laghi, i volumi di invaso sarebbero comunque tali da mitigare gli effetti dovuti alle differenze qualitative e quantitative dei rispettivi corpi idrici immissari.

In aggiunta a quanto sopra evidenziato, si sottolinea che sarà realizzata in un prossimo futuro (fonte Publiacqua, 2013) una derivazione delle acque reflue degli abitati di Neri e Castelnuovo dei Sabbioni al fine di non scaricare più direttamente nei borri, non andando quindi più a confluire nel lago di Castelnuovo. Si può ipotizzare che, realizzata tale derivazione, la qualità dell'acqua del lago di Castelnuovo sarà pertanto migliore rispetto ai risultati mostrati nella modellazione effettuata in questo rapporto.

7 BIBLIOGRAFIA CITATA O CONSULTATA

- 📖 EISENBERG D. & KAUZMANN W. (1969) - "The Structure and Properties of Water". Oxford University Press 1969.
- 📖 Enel Spa, 2003. Ingegneria Civile e Idraulica. Unità di Idrologia, Mestre (VE). "Progetto per il recupero ambientale della miniera di S.Barbara nei comuni di Cavriglia (AR) e Figline Valdarno (FI). Relazione idrologica".
- 📖 EPRI, 1979: "Methodology for evaluation of multiple power plant cooling system effects", vol.III, Data Requirements; EA-1111, Vol.III, Research project 878-1; 1979.
- 📖 FISCHER, 1979: "Mixing in inland and coastal waters"; H.B.Fischer, E.J.List, R.C.Y. Koh, J.Imberger, N.H.Brooks; Academic Press, Inc.; 1979. Italie. Traduit de l'anglais par S. Christophe. EUR 19044 FR, 45pp.
- 📖 LAMMA-CRES, 2004: Valutazione del rischio erosione: applicazioni del modello Rusle.
- 📖 LORENZEN, 1976: "A long term phosphorus model for lake application in lake Washington", in "Modeling the biochemical process in aquatic systems"; A.Arbor Sci; R.P.Canale editor; 1976.
- 📖 M. GRIMM, R. J.A. JONES, E. RUSCO and L. MONTANARELLA, 2003: Soil Erosion Risk in Italy: a revised USLE approach.
- 📖 VISMARA R., 1982: "Depurazione delle acque"; Hoepli Editore; Milano.
- 📖 VISMARA R., 1984: "Ecologia applicata, Quaderni, n°1"; Hoepli Editore; Milano.
- 📖 VISMARA R., 1992: "Ecologia applicata"; Hoepli Editore; Milano.