

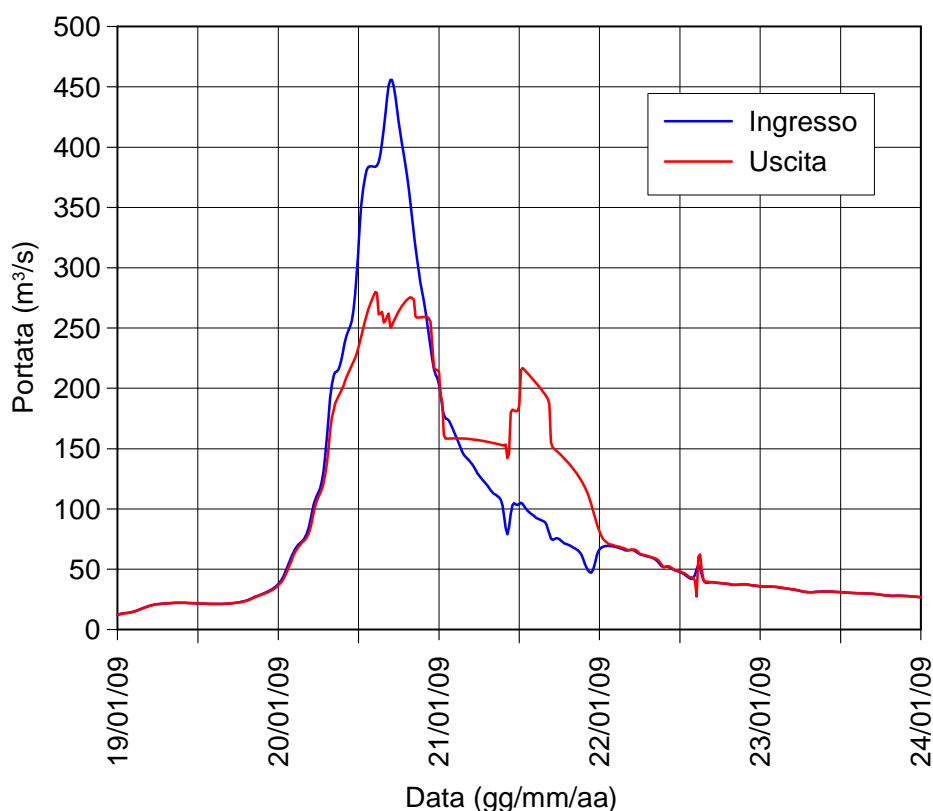


AIPO – Agenzia Interregionale
per il Fiume Po



Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente,
del Territorio ed Architettura
DICATeA - UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

Monitoraggio durante la V fase delle prove di invaso e studi sul comportamento della cassa di espansione del torrente Parma - RELAZIONE -



Responsabilità scientifica:

Prof. Paolo Mignosa (DICATeA), Dott. Fabrizio Giuffredi (AIPO)

Gruppo di lavoro:

Ing. Luca Chiapponi, Ing. Marco D'Oria, Ing. Andrea Zanini (DICATeA)

Parma, Agosto 2009

Indice

PREMESSA	1
1. MISURE EFFETTUATE	3
1.1. Livelli di invaso	3
1.2. Grado di apertura delle paratoie	3
1.3. Portate al termine della trincea drenante	4
1.4. Quote piezometriche	4
2. MISURA DELLA PORTATA AL TERMINE DEL CUNICOLO DI DRENAGGIO	12
3. CRONOLOGIA E DIARIO DEGLI EVENTI PIÙ RILEVANTI	17
4. ANALISI ED ELABORAZIONE DEI RISULTATI	22
4.1. Portate al termine del cunicolo di drenaggio	22
4.2. Quote piezometriche in corrispondenza della vasca di dissipazione	24
4.3. Quote piezometriche in corrispondenza degli argini	35
4.4. Quote piezometriche all'interno della cassa	46
5. SCALE DELLE PORTATE DEL MANUFATTO REGOLATORE	50
6. DETERMINAZIONE DEI TEMPI DI SVUOTAMENTO DELLA CASSA	53
7. INDIVIDUAZIONE DELLE PORTATE ENTRANTI NELLA CASSA	56
8. MODALITA' OPERATIVE DI MOVIMENTAZIONE DELLE PARATOIE IN CONDIZIONE DI PIENA	63
8.1. Regolazione delle paratoie	68
9. CONCLUSIONI	69
9.1. Manufatto	69
9.2. Arginature	69
9.3. Problematiche emerse e proposte di approfondimento	69

ALLEGATO A Quaderno delle attività svolte

ALLEGATO B Modellazione fisica

ALLEGATO C Portate uscenti dalla cassa di espansione in funzione del grado di apertura delle paratoie

ALLEGATO D Diagrammi dei tempi di svuotamento e curva dei volumi

PREMESSA

Nell'ambito della convenzione quadro *“Studio delle interazioni tra grandi opere di sbarramento fluviale e sistema acquifero sotterraneo, in riferimento anche alle pressioni interstiziali che si propagano alle fondazioni delle opere di sbarramento: sviluppo di un modello concettuale di comportamento su base fisico-matematica e sperimentazioni sulla cassa di espansione del torrente Parma nei comuni di Parma e Basilicanova”*, l'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPO) ha affidato al Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio ed Architettura (DICATeA) dell'Università degli Studi di Parma l'incarico del monitoraggio dell'opera di sbarramento della cassa di espansione sul torrente Parma durante la V fase delle prove di invaso, della progettazione del sistema di misura della portata al termine del cunicolo di drenaggio, dell'effettuazione delle misure stesse per tutta la durata delle prove di invaso, nonché della realizzazione di alcuni studi ulteriori.

La presente relazione affronta tutti i punti indicati nell'Articolo 2 (Articolazione dello studio) della predetta Convenzione, ed in particolare:

- a) l'assistenza ai tecnici AIPO, mediante sopralluoghi giornalieri alla cassa durante l'effettuazione delle previste nuove prove di invaso, per controllare l'andamento dei livelli di invaso, i settaggi del regolatore di livello, il monitoraggio delle eventuali perdite che dovessero manifestarsi in corrispondenza del cunicolo di drenaggio nonché per eseguire n.1 misura giornaliera di portata al termine del cunicolo stesso. Questi aspetti sono trattati nei Capitoli 1 e 3 della presente relazione;
- b) la progettazione e realizzazione del sistema di misura delle portate al termine del cunicolo di drenaggio (Capitolo 2);
- c) l'analisi ed elaborazione dei risultati e trasferimento degli stessi al gruppo di lavoro incaricato dello svolgimento degli invasi sperimentali ed ai responsabili scientifici delle convenzioni già in atto (Capitolo 4);
- e) l'individuazione in via indiretta, in base ai livelli di invaso registrati ed alla storia temporale dell'apertura delle paratoie, delle portate in ingresso alla cassa (Capitolo 7); tale punto era alternativo al punto d);
- f) la determinazione dei tempi di svuotamento della cassa, in base al numero ed al grado di apertura delle paratoie di regolazione (Capitoli 5 e 6);

- g) la proposta di modalità operativamente semplici ed applicabili in condizioni di piena di movimentazione delle paratoie al fine di ottimizzare il funzionamento della cassa, migliorandone il rendimento di laminazione (Capitolo 8).

1. MISURE EFFETTUATE

Durante la quinta fase delle prove di invaso sulla cassa di espansione del torrente Parma (aprile-luglio 2008) sono stati acquisiti, monitorati e memorizzati i dati riportati nel seguito.

1.1. Livelli di invaso

I livelli nell'invaso sono stati rilevati mediante una sonda ad immersione ed una sonda ultrasonica che trasmettono i dati alla cabina di controllo della cassa dalla quale sono consultabili e scaricabili attraverso il PC e relativo software di gestione e controllo.

Il trasduttore ad immersione è installato all'interno di un tubo ancorato al paramento di monte in corrispondenza della pila sinistra della paratoia centrale; il misuratore ad ultrasuoni è invece installato all'altezza del coronamento, in corrispondenza della sommità della medesima pila.

Il misuratore ad immersione, a causa dell'ubicazione della sonda, non è in grado di misurare i livelli al di sotto di quota 91.50 m s.l.m.; a questo livello e in condizioni di efflusso a pelo libero corrisponde una portata uscente di circa 4 m³/s per ogni paratoia aperta. Il misuratore ad ultrasuoni rileva invece solo a partire da quota 99.00 m s.l.m..

I valori restituiti sono ottenuti da una media delle misure su un periodo minimo di 300 secondi del valore istantaneo, filtrati per attenuare l'effetto di ondulazioni di livello di breve periodo. Dall'analisi dei livelli misurati dalla sonda ad ultrasuoni si nota una forte dipendenza del valore restituito dalla temperatura dell'aria. Pertanto nel prosieguo della presente relazione si farà riferimento esclusivamente ai livelli restituiti dalla sonda ad immersione, le cui letture sono state validate con misure manuali del livello di invaso a varie quote.

1.2. Grado di apertura delle paratoie

Il manufatto regolatore dispone di 3 paratoie regolabili la cui apertura può variare tra 0 e 250 cm. Il software di gestione e controllo delle paratoie registra la posizione di ciascuna paratoia in termini di distanza (in cm) dal fondo luce. I dati sono disponibili con una scansione temporale minima di 1 minuto.

La conoscenza del grado di apertura è fondamentale per calcolare le portate uscenti dall'invaso durante l'intero periodo di prova; durante le prove di invaso le suddette paratoie sono state movimentate manualmente e automaticamente da un software di regolazione di livello. Per gradi di apertura molto piccoli (pochi centimetri) il dato restituito è poco affidabile e poco ripetibile, con errori percentuali anche molto elevati: non è infrequente, ad esempio, che un'apertura segnalata di 2-5 centimetri corrisponda in realtà ad una chiusura totale. Ciò limita fortemente la possibilità di

effettuare una regolazione fine, come sarebbe necessario qualora si volesse erogare una modesta portata, dell'ordine di $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

1.3. Portate al termine della trincea drenante

Le portate raccolte dalla trincea drenante vengono convogliate, attraverso un cunicolo di collegamento, ad un pozzetto cilindrico di area nota. Il livello idrico nel pozzetto è mantenuto sconnesso da quello del dreno, tramite l'ausilio di pompe attivate automaticamente da un sistema di lettura del livello. Qualora si verificasse la possibilità di connessione idraulica tra il livello del pozzetto e il livello del dreno le pompe entrano in funzione svuotando il pozzetto fino al raggiungimento di un livello minimo.

La misura di portata è stata realizzata misurando il tempo di risalita del livello all'interno del pozzetto a pompe ferme. Per una completa descrizione del funzionamento si veda il Capitolo 3.

1.4. Quote piezometriche

Le quote piezometriche, durante tutto il periodo degli invasi sperimentali, sono state rilevate in corrispondenza delle seguenti zone:

- Manufatto regolatore: piezometri R, S, T, U, α (Figura 1-1);
- Platea di valle: piezometri 1, 3, 5, 7, 10, 12, T1, WA, WB, WC, XA, XB, XC, YA, YB, YC, ZA, ZB, ZC (Figura 1-2);
- Arginatura dx: piezometri G, H, I, I1, I2, L, L1, L2, L3, M csa, M ta, M1, M2, M3, N, N1, N2, N3, O, O2, P, P2, Q, Q2, S4A, S4B, S4C, S5A, S5B, S5C, S6A, S6B, S6C, S9A, S9B (Figura 1-3 e Figura 1-5);
- Arginatura sx: piezometri A, B, C, D, E csa, E ta, F, S3A, S3B, S3C, S7A, S7B, S7C, S8A, S8B, S8C (Figura 1-4 e Figura 1-5);
- Alveo a valle del manufatto: piezometri S1A, S1B, S1C, S2A, S2B, S2C (Figura 1-5);
- Pozzo nel piazzale: POZZO (Figura 1-2) disponibile dall'inizio di maggio 2008 e durante le sole prove di pompaggio dell'acquifero profondo.

Le Tabelle 1-1 e 1-2 riportano le caratteristiche di ciascuno dei piezometri ed in particolare la quota bocca pozzo, la posizione, il diametro, la profondità, la finestratura e il tipo di lettura (automatica o manuale). I piezometri a lettura automatica sono dotati di una sonda di livello ad immersione che trasferisce il dato, alla centralina a cui è connesso, con una scansione temporale prefissata a 2 ore (salvo diversa impostazione durante alcuni periodi). I dati, memorizzati dalle centraline, sono stati scaricati tramite PC e, per alcuni piezometri, anche inviati via GPRS ad un server consultabile via

Web. Il livello piezometrico nei piezometri a lettura manuale è stato effettuato invece mediante freatimetro.

Tabella 1-1 - Elenco e caratteristiche dei piezometri a valle del manufatto e sull'argine destro.

Zona	Nome	Coordinate Gauss-Boaga		Quota B.P. [m s.l.m.]	Diametro [mm]	Profondità [m]	Finestratura da a [m]		Lettura Auto/ Man	Note
		X [m]	Y [m]							
Valle dx	S1A	1606487.58	4954940.48	89.05	50	36.3	33.0	36.0	A	
	S1B	1606488.46	4954935.50	89.05	50	21.0	18.0	21.0	A	
	S1C	1606488.79	4954932.77	89.05	50	10.3	7.0	10.0	A	
Valle sx	S2A	1606420.22	4954942.46	88.74	50	35	32.50	35.0	A	
	S2B	1606422.68	4954939.83	88.74	50	21.0	18.0	21.0	A	
	S2C	1606424.69	4954937.56	88.78	50	11.0	8.0	11.0	A	
Argine dx	G	1606549.56	4954758.00	99.20	50	15.0	3.0	15.0	M	
	H	1606616.59	4954742.75	98.05	50	10.0	3.0	10.0	M	
	I	1606685.76	4954727.67	98.03	50	10.0	3.0	10.0	M	
	I2	1606678.31	4954692.30	110.55	50	24.0	1.0	23.0	M	
	L	1606762.18	4954711.37	97.92	50	12.0	3.0	12.0	M	
	L1	1606839.90	4954888.02	105.25	50	17.0	1.0	17.0	M	
	L2	1606750.71	4954673.80	110.61	50	23.0	1.0	23.0	M	
	L3	1606750.31	4954672.43	110.27	50	11.0	2.0	11.0	M	
	M csa	1606827.90	4954692.55	97.97	50		30.0		M	Cella Casagrande
	M ta	1606827.90	4954692.55	97.97	50	30.0	3.0	10.0	M	
	M1	1606818.49	4954672.46	104.78	50	17.5	1.0	17.0	M	
	M2	1606812.43	4954657.15	110.35	50	24.0	1.0	23.0	M	
	M3	1606812.34	4954656.21	110.01	50	11.0	2.0	11.0	M	
	N	1606891.13	4954664.64	97.71	50	10.0	3.0	10.0	M	
	N1	1606870.52	4954641.86	104.37	50	17.5	1.0	17.0	M	
	N2	1606861.51	4954631.79	110.48	50	23.8	1.0	23.8	M	
	N3	1606860.32	4954630.08	110.14	50	11.0	2.0	11.0	M	
	O	1606899.40	4954579.70	98.02	50	10.0	3.0	10.0	M	
	O2	1606925.89	4954595.16	110.51	50	24.0	3.0	24.0	M	
	P2	1000632.28	4954709.96	110.23	50	24.0	3.0	24.0	M	
	Q	1606925.24	4954443.62	99.56	50	10.0	3.0	10.0	M	
	Q2	1606948.84	4954450.18	110.73	50	24.0	3.0	24.0	M	
	S4A	1606518.22	4954656.35	93.68	50	35.0	31.0	34.5	A	
	S4B	1606521.50	4954655.61	93.67	50	23.0	20.0	23.0	A	
	S4C	1606524.73	4954654.52	93.57	50	9.0	6.0	9.0	A	
	S5A	1606853.51	4954568.68	97.16	50	35.0	32.0	35.0	A	
	S5B	1606855.05	4954565.30	97.14	50	19.5	16.5	19.5	A	
	S5C	1606856.42	4954562.69	97.18	50	9.3	6.0	9.0	A	
	S6A	1606909.50	4954190.22	97.14	50	35.0	22.0	24.0	A	
	S6B	1606909.63	4954194.90	97.18	50	20.5	17.0	20.0	A	
	S6C	1606909.64	4954187.38	97.19	50	9.0	6.0	9.0	A	
	S9A	1606811.20	4953226.90	109.63	50	35.0	22.0	25.0	A	
	S9C	1606813.77	4953227.80	109.60	50	7.0	4.0	7.0	A	

Tabella 1-2 - Elenco e caratteristiche dei piezometri sull'argine sinistro, in platea e nel manufatto.

Zona	Nome	Coordinate Gauss-Boaga		Quota B.P. [m s.l.m.]	Diametro [mm]	Profondità [m]	Finestratura da a [m]		Lettura Auto/ Man	Note
		X [m]	Y [m]							
Argine sx	A	1606110.37	4954627.11	98.20	50	10.0	3.0	10.0	M	
	B	1606131.50	4954703.06	97.83	50	10.0	3.0	10.0	M	
	C	1606166.76	4954770.67	97.74	50	12.0	3.0	12.0	M	
	D	1606230.73	4954816.94	97.27	50	10.0	3.0	10.0	M	
	E ta	1606286.50	4954832.16	97.26	50	30.0	3.0	10.0	M	
	E csa	1606286.50	4954832.16	97.26		30.0			M	Cella Casagrande
	F	1606347.68	4954826.31	97.82	50	15.0	3.0	15.0	M	
	S3A	1606270.39	4954716.04	93.34	50	35.0	32.0	35.0	A	
	S3B	1606274.83	4954716.76	93.31	50	20.1	15.0	18.0	A	
	S3C	1606278.19	4954716.66	93.32	50	11.0	8.0	11.0	A	
	S7A	1605928.68	4954138.92	98.01	50	35.0	32.0	35.0	A	
	S7B	1605928.08	4954136.15	98.01	50	21.0	18.0	21.0	A	
	S7C	1605929.46	4954142.05	97.85	50	7.5	4.5	7.5	A	
	S8A	1606014.50	4953511.13	102.26	50	35.0	26.0	29.0	A	
	S8B	1606013.91	4953513.87	102.11	50	21.0	18.0	21.0	A	
	S8C	1606013.14	4953516.76	102.09	50	11.0	8.5	11.0	A	
Platea	1	1606483.61	4954744.94	89.18	50	4.0			A	Tubo Aperto
	3	1606452.69	4954751.65	89.15	50	4.0			A	Tubo Aperto
	5	1606426.96	4954757.49	89.21	50	4.0			A	Tubo Aperto
	7	1606389.25	4954769.79	89.20	50	4.0			A	Tubo Aperto
	10	1606477.58	4954774.47	89.19	50	4.0			A	Tubo Aperto
	12	1606410.13	4954792.93	89.18	50	4.0			A	Tubo Aperto
	T1	1606385.07	4954801.44	95.38	50	25.0	21.0	24.0	A	
	WA	1606427.38	4954787.47	89.20		30.0			A	Cella Casagrande
	WB	1606428.02	4954788.54	89.21		10.0			A	Cella Casagrande
	WC	1606428.68	4954787.54	89.19		3.0			A	Tubo Aperto
	XA	1606415.70	4954769.10	89.20		30.0			A	Cella Casagrande
	XB	1606413.88	4954768.45	89.22		10.0			A	Cella Casagrande
	XC	1606413.28	4954767.51	89.20		3.0			A	Tubo Aperto
	YA	1606460.89	4954756.62	89.19		30.0			A	Cella Casagrande
	YB	1606459.19	4954755.98	89.20		10.0			A	Cella Casagrande
	YC	1606459.35	4954754.72	89.19		3.0			A	Tubo Aperto
	ZA	1606460.32	4954781.93	89.43		30.0			A	Cella Casagrande
	ZB	1606459.11	4954781.36	89.26		10.0			A	Cella Casagrande
	ZC	1606459.22	4954779.93	89.17		3.0			A	Tubo Aperto
	Pozzo	1606527.48	4954799.40	98.50	500	46.0	39.0	45.0	AM	
Manufatto	Alfa			91.36	50	7.16	-	-	AM	Dreno
	R			96.25	300	12.05	-	-	AM	Corridoio sup. sx
	S			96.25	300	12.05	-	-	AM	Corridoio sup. dx
	T			91.39	300	5.19	-	-	AM	Pozzetto sx
	U			91.36	300	5.16	-	-	AM	Pozzetto dx

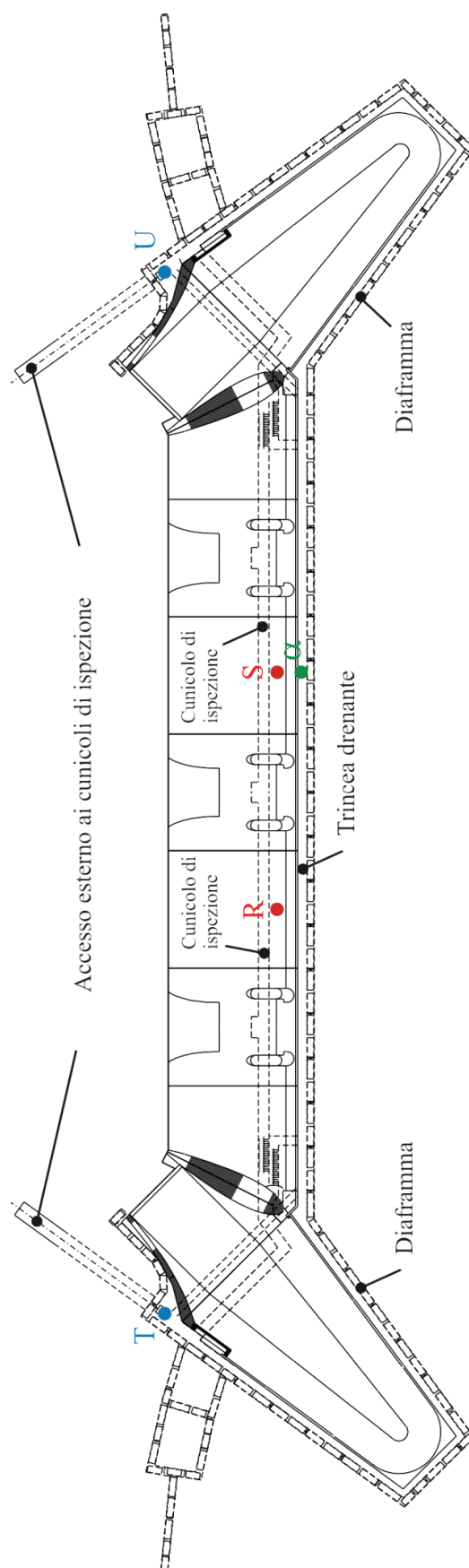


Figura 1-1 - Ubicazione dei piezometri all'interno del manufatto regolatore.



Figura 1-2 - Ubicazione dei piezometri in corrispondenza della platea di valle.



Figura 1-3 - Ubicazione dei piezometri in corrispondenza dell'arginatura destra.

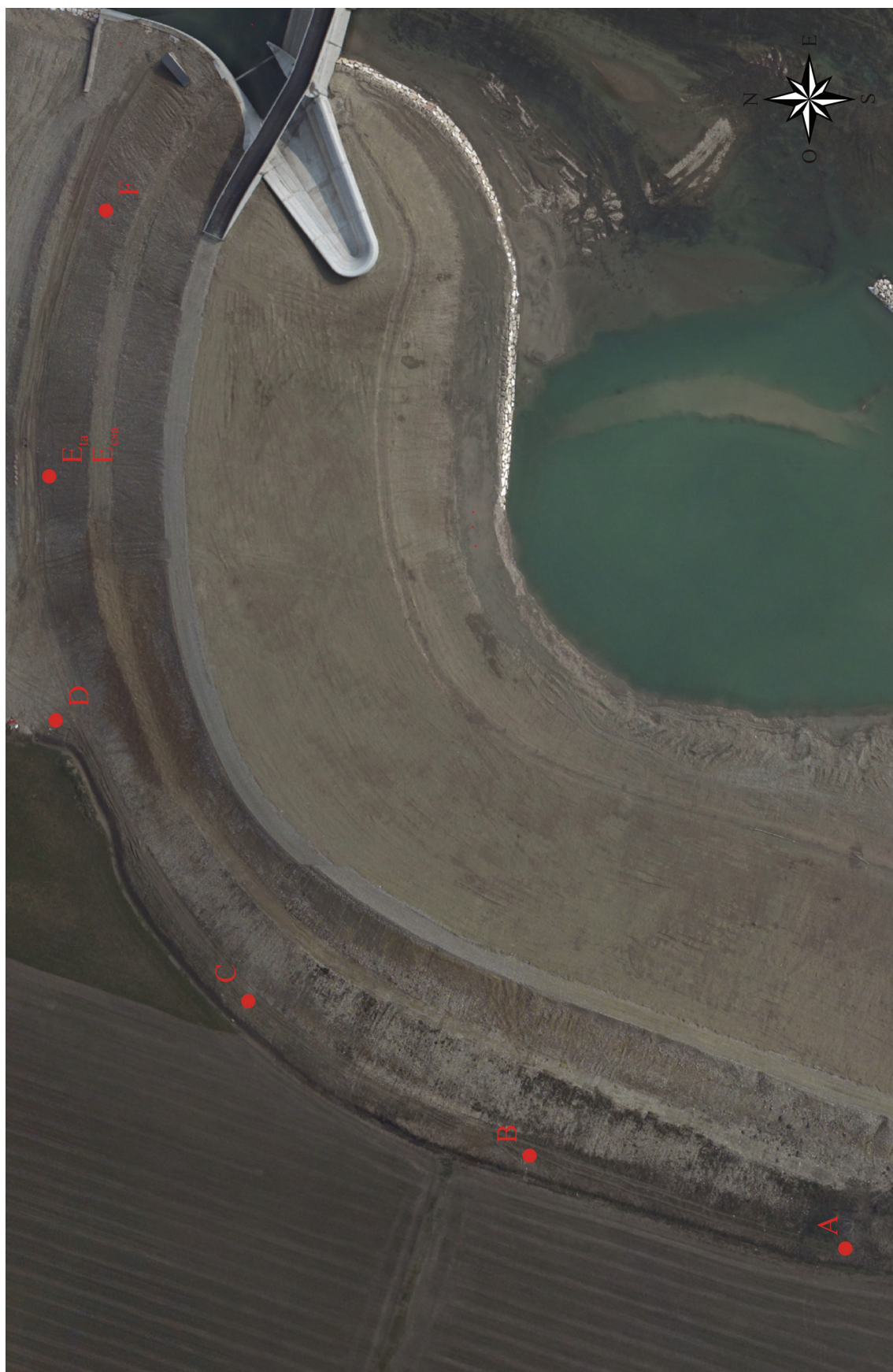


Figura 1-4 - Ubicazione dei piezometri in corrispondenza dell'arginatura sinistra.



Figura 1-5 - Ubicazione dei piezometri a valle del manufatto e al piede interno dell'argine.

2. MISURA DELLA PORTATA AL TERMINE DEL CUNICOLO DI DRENAGGIO

Le portate raccolte dalla trincea drenante vengono convogliate, attraverso un cunicolo di collegamento a fondo orizzontale posto a quota 87.90 m s.l.m., ad un pozzetto cilindrico di area 5.62 m^2 la cui base è posta a quota 87.30 m s.l.m. (Figura 2-1). Il salto disponibile garantirebbe, se i livelli idrici nel pozzetto fossero al di sotto della quota del fondo del canale di collegamento, il passaggio della corrente attraverso lo stato critico e quindi una sconnessione idraulica tra trincea drenante e pozzetto.

Dal pozzetto si diparte un tubo in cls DN 800, il cui imbocco è anch'esso a quota 87.90 m s.l.m., che allontana le acque scaricandole circa un chilometro a valle del manufatto in corrispondenza di una briglia posta in alveo. Sul fondo del pozzetto sono state posizionate 2 pompe che, se azionate, scaricano l'acqua nella vasca di dissipazione, mediante una breve tubazione di mandata dotata di clapet. Le pompe hanno potenza sufficiente a garantire lo svuotamento del pozzetto fino a valori di portata provenienti dalla trincea drenante di circa 16-17 l/s.

La portata drenata viene dedotta da una misura volumetrica; in pratica si misura il tempo necessario all'acqua per risalire nel pozzetto, precedentemente svuotato mediante le pompe, sino ad una quota poco al di sotto della quota di imbocco del tubo di scarico (87.90 m s.l.m.). Essendo il pozzetto cilindrico, dalla variazione di livello si risale immediatamente al volume accumulato e, dividendo per l'intervallo di tempo, alla portata media pervenuta al pozzetto dalla trincea drenante.

L'allineamento in quota del fondo del cunicolo di collegamento tra pozzetto e trincea drenante e dell'imbocco del tubo di scarico, unitamente al cattivo posizionamento di quest'ultimo che presenta almeno un dosso nel suo cammino, fa sì che le portate, anche di piccola entità, necessitino di un tirante di almeno 10 cm sul fondo tubo per essere allontanate. Di questo ne risentono i livelli idrici dell'intero dreno, che tende ad invasarsi.

In occasione delle misure di portata effettuate nei primi giorni di invaso si è rilevato che il tempo necessario ad esaurire il transitorio che si instaura nella trincea drenante a causa dello svuotamento del pozzetto finale mediante le pompe risulta di parecchie ore. Durante tutto questo periodo la portata proveniente dalla trincea è superiore a quella effettivamente drenata, a causa dell'abbassamento del livello idrico lungo tutto il cunicolo. Per questo motivo si è deciso di automatizzare il gruppo di pompe affinché, durante l'intero periodo delle prove di invaso, il

livello nel pozzetto rimanesse sempre tale da garantire la sconnessione idraulica del dreno e da rendere quindi la misura della portata non affetta da transitori imposti artificialmente.

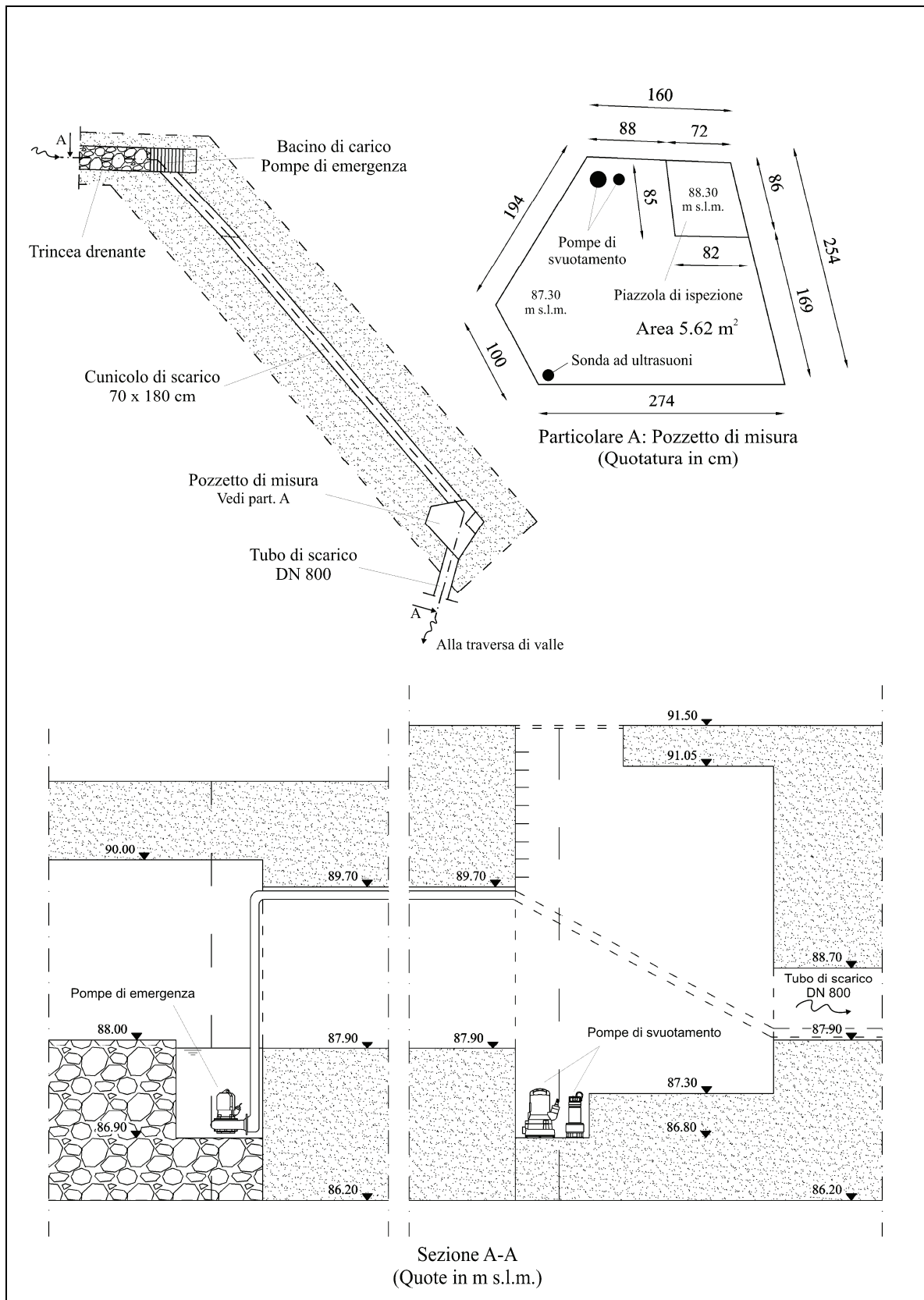


Figura 2-1 – Schema del dispositivo per la misura delle portate.



Figura 2-2 –Dispositivo per la misura delle portate.

Per una maggiore accuratezza, nel pozzetto di misura è stata posizionata una sonda di livello ad ultrasuoni (all'interno di un tubo in PVC che funge da elemento di calma) con un range di funzionamento da 300 a 2000 mm.

La sonda rileva in continuo la quota idrica all'interno del pozzetto e la visualizza all'esterno mediante il display di un modulo di condizionamento del segnale che ne permette l'acquisizione mediante un PC (Figura 2-2). Acquisendo e analizzando l'andamento nel tempo della risalita del livello nel pozzetto (a pompe spente) si deduce il valore della portata drenata.

Il sistema di acquisizione si basa sul sistema modulare proposto dalla National Instruments ed è governato dal software Labview 8.0.

Il software di acquisizione (Figura 2-3 e Figura 2-4) mostra in tempo reale il livello all'interno del pozzetto e calcola la portata media. Il livello osservato e il tempo, a partire dall'inizio dell'acquisizione, vengono memorizzati in un file di testo e successivamente rielaborati.

La portata transitante viene valutata come valore medio nel periodo di risalita pari alla durata dell'acquisizione. Il grafico livello-tempo (si veda la Figura 2-5) permette di dedurre una retta interpolante la cui pendenza rappresenta la portata per unità di area. Questo valore moltiplicato per la superficie del pozzetto rappresenta la portata media drenata.



Figura 2-3 Software di acquisizione del livello e calcolo della portata drenata

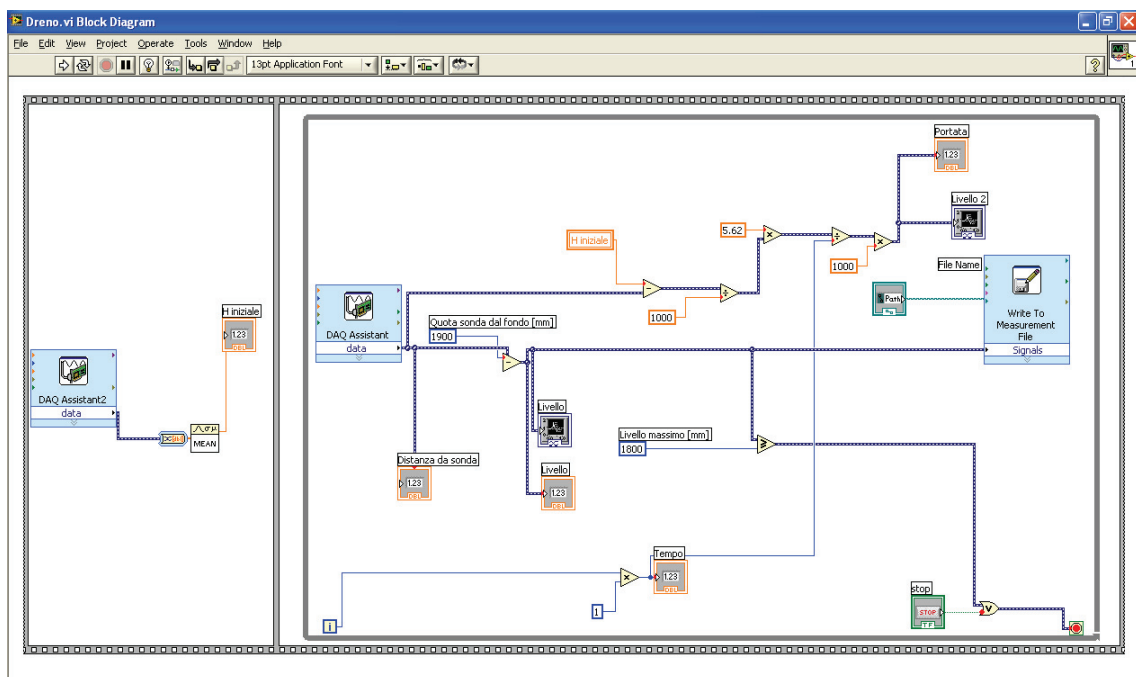


Figura 2-4 Schema del software

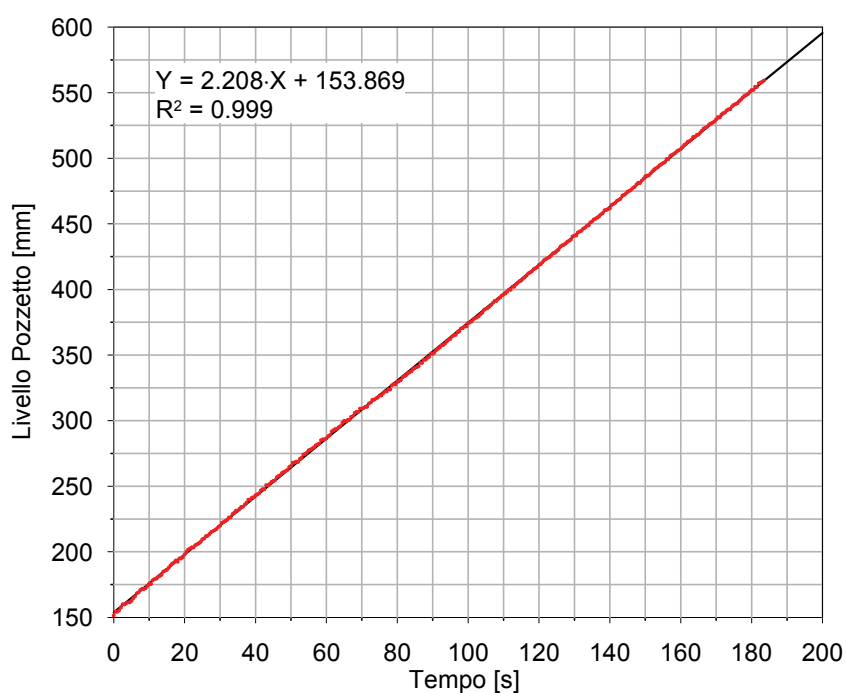


Figura 2-5 Esempio di livello osservato (in nero) all'interno del pozzetto di misura e relativa interpolazione (in rosso)

3. CRONOLOGIA E DIARIO DEGLI EVENTI PIÙ RILEVANTI

Le prove di invaso hanno avuto inizio in data 17 marzo 2008 e, come risulta dalla Figura 3-1, hanno subito diverse vicende, le principali delle quali sono di seguito brevemente descritte (in dettaglio nell'ALLEGATO A):

- in data 26 marzo 2008, dopo una fase preliminare di invaso volta a controllare eventuali perdite in corrispondenza dei giunti, si inizia a svuotare la cassa al fine di consentire la riparazione della paratoia N.3 (sponda sx) che non chiudeva perfettamente (minima apertura 12-13 cm);
- il giorno 27 si giunge al totale svuotamento e si verifica la presenza di una bombola incastrata tra la paratoia ed il paramento di monte del manufatto; nel pomeriggio del giorno 27 marzo si riprende ad invasare;
- nei giorni successivi si riscontra la presenza di numerose venute nel cunicolo di drenaggio, chiaramente non ascrivibili a processi di filtrazione attraverso il diaframma al di sotto del manufatto ma a perdite in corrispondenza dei giunti del cordolo di monte ed a quelli dei conci in elevazione; si ritiene indispensabile intervenire realizzando una raccolta separata di tali acque in modo da by-passare la vasca di misura delle portate posta al termine del cunicolo di drenaggio e non influenzarne la misura;
- in data 2 aprile la cassa viene nuovamente svuotata per poter intervenire dall'esterno a sigillare due venute molto ingenti nel cunicolo di drenaggio in sponda sx; l'intervento ha successo solo parzialmente su una delle due; l'altra viene provvisoriamente ripresa dall'interno mediante canalina di gronda, con scarsi risultati;
- in data 4 aprile verso sera si chiudono le paratoie e si riprende ad invasare;
- nei dieci giorni successivi (5-14 aprile) si procede regolarmente ad invasare, misurando giornalmente la portata nel cunicolo di drenaggio, tenendo sotto osservazione le pressioni nei piezometri sottoplatea (che non destano particolari preoccupazioni) ed i piezometri nei corpi arginali;
- in data 15 aprile l'invaso raggiunge quota 103.24 m s.l.m., circa 60 centimetri al di sotto delle quota massima raggiunta in data 24 novembre 2006 (103.85 m s.l.m.), in occasione della quarta fase degli invasi sperimentali. Si evidenzia una venuta di acqua di svariati litri/sec al piede dell'argine dx, in corrispondenza del punto 1 di Figura 3-2, al termine di una strada carraia. Tecnici e personale AIPO intervengono confinando la venuta mediante realizzazione di una coronella; si decide di aprire le paratoie per abbassare il livello fino a quota 101.50 m s.l.m.;

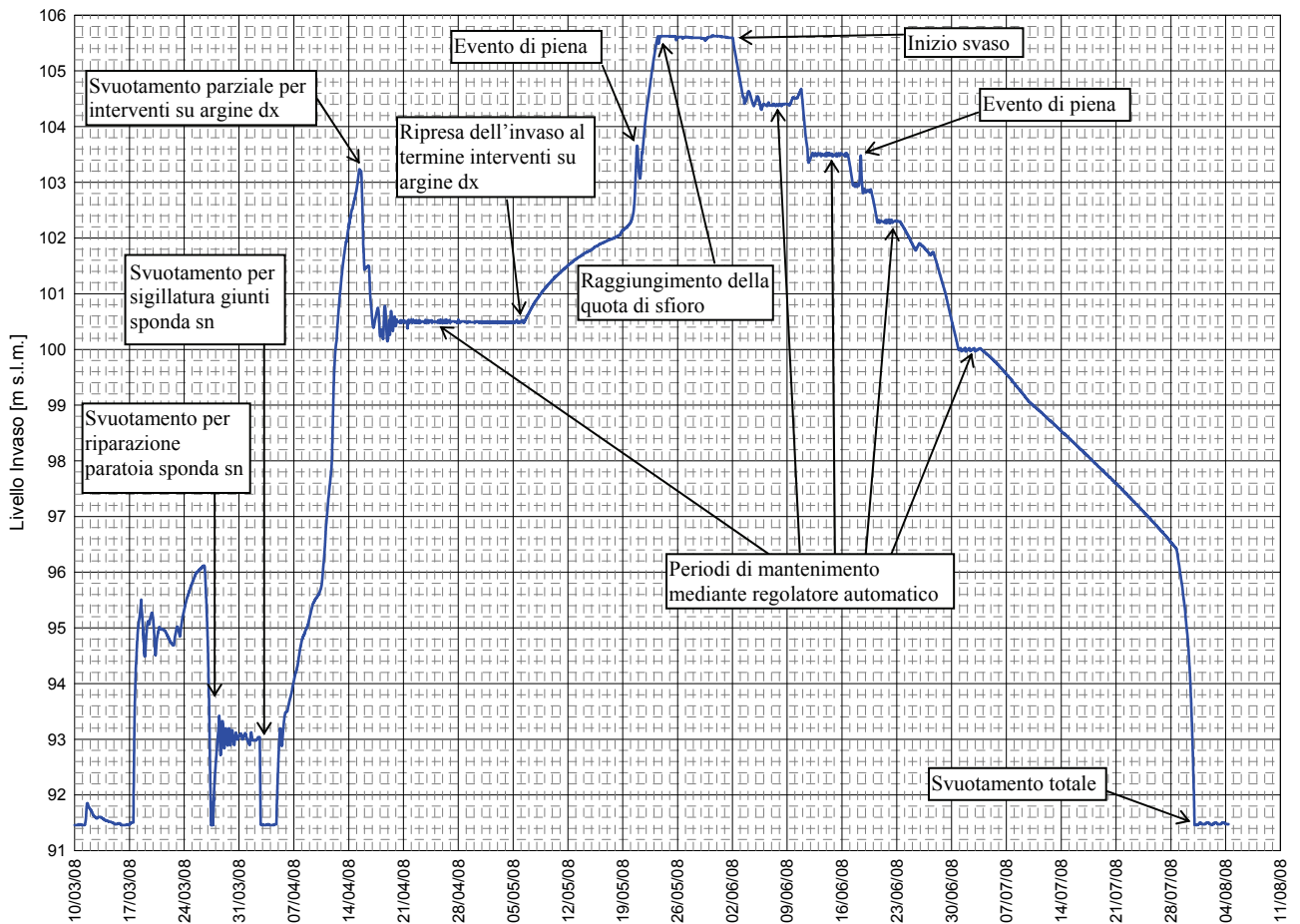


Figura 3-1 - Cronologia dell'andamento dei livelli nella cassa durante la prova di invasione e principali eventi.

- in data 16 aprile, poiché il terreno all'interno della coronella non è ancora asciutto (per quanto la venuta si sia arrestata), si decide di abbassare ulteriormente il livello fino a portarlo a quota 100.60 m s.l.m.;
- in data 17 aprile si rinviene la presenza di un tubo ϕ 160 mm, probabilmente traversante l'argine. Un'ispezione lato lago consente di individuarne l'origine;
- in data 18 aprile si rinviene, dopo segnalazione, un secondo tubo in corrispondenza del punto 2 di Figura 3-2. Nel tubo è ancora inserita una manichetta di irrigazione;
- nei giorni successivi si procede ad effettuare una serie di indagini geoelettriche al fine di chiarire meglio la struttura dell'argine in corrispondenza degli attraversamenti dei tubi; il livello nell'invaso viene mantenuto costante a quota 100.50 m s.l.m.;
- il giorno 6 maggio, dopo l'intasamento dei tubi, si decide di riprendere ad invasare con gradualità la cassa;
- nelle due settimane successive (7-20 maggio) si procede regolarmente ad invasare, con incrementi via via minori a causa dell'esaurimento delle portate in ingresso, misurando

giornalmente la portata nel cunicolo di drenaggio, tenendo sotto osservazione le pressioni nei piezometri sottoplatea (che non destano particolari preoccupazioni) ed i piezometri nei corpi arginali;

- la sera del giorno 20 maggio importanti precipitazioni sul bacino del torrente Parma provocano un aumento del gradiente di crescita del livello nella cassa; nella notte interviene il regolatore posto a quota 103.50 m s.l.m. che interrompe la crescita; per evitare risalite troppo rapide si decide di mantenere tale livello fino al termine della fase di crescita delle portate in ingresso e di attendere la coda dell'evento di piena per proseguire ad invasare;
- in data 21 maggio la piena in ingresso è in esaurimento e si decide di procedere ad invasare fino a raggiungere la quota di sfioro;
- il giorno successivo (22 maggio) il livello cresce regolarmente di circa 4-5 cm l'ora; il raggiungimento della quota di sfioro (105.60 m s.l.m.) è previsto per le prime ore del giorno successivo;
- in data 23 maggio, verso le 7:00 della mattina, inizia a sfiorare il becco d'anatra di sx, evidentemente leggermente più basso del resto del manufatto; nelle ore successive prende a sfiorare, contemporaneamente, il corpo del manufatto ed il becco d'anatra di dx;
- si decide di mantenere le paratoie chiuse e prolungare lo sfioro anche nei giorni successivi, monitorando attentamente le perdite nel manufatto, le pressioni in platea e nei corpi arginali; si continuano nel frattempo le ispezioni al piede d'argine al fine di verificarne la tenuta idraulica;
- in data 30 maggio viene individuata una venuta d'acqua dall'argine in sponda dx in corrispondenza del punto 3 in Figura 3-2. Si realizza una coronella in terra e la perdita viene confinata;
- nella stessa giornata si interviene più a monte, in corrispondenza del punto 4 di Figura 3-2. Ivi, in corrispondenza dell'intersezione tra piede d'argine e la rampa della strada carraia che consente di salire sul coronamento, si è formata un'ampia pozza, che non sembra ascrivibile ad accumulo dovuto alle recenti piogge. La pozza viene prosciugata ma tende molto lentamente a riformarsi. Si decide di monitorarla attentamente, ma non si ritiene necessario intervenire;
- la sera del 31 maggio si nota un'ampia venuta al piede dell'argine sinistro in corrispondenza della strada che porta al coronamento (punto 5 in Figura 3-2); la venuta si estende longitudinalmente per circa una quarantina di metri;
- in data 1 giugno si realizza una coronella in terra per confinare la perdita rinvenuta il giorno precedente; durante i lavori si scopre un tubo ϕ 80 mm che proviene dall'argine dal quale fuoriesce abbondante acqua che scarica nel vicino canale; si posiziona una curva ed uno

spezzone di tubo verticale di lunghezza 2 metri, in cui l'acqua risale fino a circa metà; una prova di insufflazione d'aria innesca un'oscillazione di massa nel tubo che evidenzia la presenza di una superficie libera a qualche distanza all'interno dell'argine; si decide di tenere attentamente monitorata la zona, ripromettendosi di verificarne l'origine dopo lo svuotamento dell'invaso ed intervenire per saturarlo;

- nello stesso giorno percorrendo il canale verso monte si evidenzia una zona molto umida, in cui il piede dell'argine è saturo ed il fondo del canale è in parte bagnato, mentre verso monte è totalmente asciutto (punto 6 di Figura 3-2);
- nelle prime ore della notte del giorno 2 giugno, a causa delle venute dagli argini riscontrate nei giorni precedenti, si decide di aprire le paratoie fino al raggiungimento della quota 104.50 m s.l.m.; da questo momento inizia la fase di svaso;
- il giorno 3 giugno si imposta il regolatore di livello a quota 104.40 m. s.l.m., con l'intenzione di mantenere tale quota per circa una settimana;
- la sera del 10 giugno si apre manualmente una paratoia con l'obiettivo di abbassare il livello dell'invaso e portarlo, nell'arco di circa una giornata, a quota 103.50 m s.l.m.;
- il giorno 11 giugno si imposta il regolatore di livello a quota 103.50 m. s.l.m., con l'intenzione di mantenere tale quota per circa una settimana;
- nel tardo pomeriggio del giorno 16 giugno si apre manualmente una paratoia con l'obiettivo di abbassare il livello dell'invaso e portarlo, nell'arco di circa una giornata, a quota 103.00 m s.l.m.;
- la sera del 17 giugno, precipitazioni piuttosto intense sul bacino del torrente Parma provocano un innalzamento del livello dell'invaso che, nonostante l'intervento del regolatore di livello impostato a quota 102.95 m s.l.m., raggiunge quota 103.46 m s.l.m. nella mattina del giorno 18 giugno. Agendo manualmente sulle paratoie si riporta rapidamente il livello a quota 102.85 m s.l.m.;
- il giorno 19 giugno si apre manualmente una paratoia e si porta il livello a quota 102.30 m s.l.m.; si imposta poi il regolatore di livello a tale quota;
- il giorno 23 giugno si apre manualmente una paratoia con l'obiettivo di raggiungere la quota 101.80 m s.l.m.;
- nel pomeriggio del 26 giugno si decide di aprire ulteriormente la paratoia per portare, nell'arco di qualche giorno, il livello a quota 100.00 m s.l.m.;
- il giorno 1 luglio si imposta il regolatore di livello a quota 100.00 m. s.l.m., con l'intenzione di mantenere tale quota per circa una settimana;

- il giorno 3 luglio si constata che, per mantenere il livello di invaso a quota 100 m s.l.m., il regolatore è costretto a chiudere completamente le paratoie, poiché la portata in ingresso alla cassa è ormai pressoché nulla. Nel primo pomeriggio si decide allora di aprire manualmente una paratoia di circa 2 cm (teorici) per consentire uno svuotamento lento dell'invaso e allo stesso tempo garantire un deflusso nell'alveo a valle di circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$;
- il giorno 28 luglio alle 19:00 si aumenta l'apertura della paratoia a circa 10 cm, per accelerare la fase terminale di svuotamento;
- il giorno 31 luglio l'invaso risulta completamente vuoto.



Figura 3-2 - Posizione delle principali venute d'acqua riscontrate durante l'esecuzione degli invasi sperimentali.

4. ANALISI ED ELABORAZIONE DEI RISULTATI

4.1. Portate al termine del cunicolo di drenaggio

La Figura 4-1 riporta l'andamento temporale delle portate misurate al termine del cunicolo di drenaggio, assieme al corrispondente andamento delle quote di invaso. Dal grafico si nota, come era lecito aspettarsi, un sostanziale incremento delle portate misurate al crescere delle quote di invaso. L'aumento non è però ascrivibile solo all'accresciuta portata di filtrazione intercettata dal cunicolo di drenaggio, ma anche alla non perfetta tenuta dei giunti del cordolo di monte e di quelli dei conci in elevazione. Tali perdite erano già evidenti all'inizio delle prove di invaso, ma sono andate crescendo sia di numero che di rilevanza man mano che il livello si innalzava.

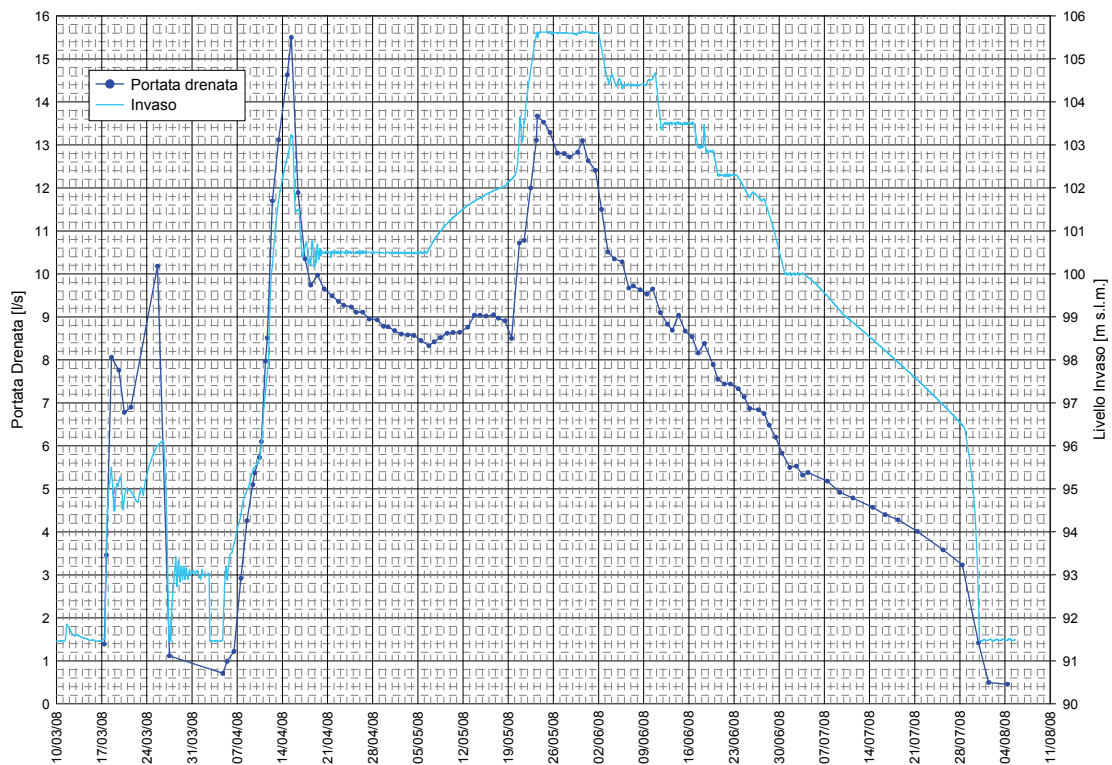


Figura 4-1 - Andamento temporale delle portate misurate al termine del cunicolo di drenaggio e corrispondente andamento delle quote di invaso.

Nella Figura 4-2 è riportata l'ubicazione e nella Figura 4-3 le fotografie di quelle più rilevanti. Gli andamenti temporali riportati in Figura 4-1 evidenziano però anche un altro non trascurabile aspetto: nei periodi in cui il livello di invaso è stato mantenuto costante per parecchi giorni consecutivi (20 aprile-7 maggio 2008; 24 maggio-2 giugno 2008) le portate misurate, anziché mantenersi costanti, sono significativamente diminuite.

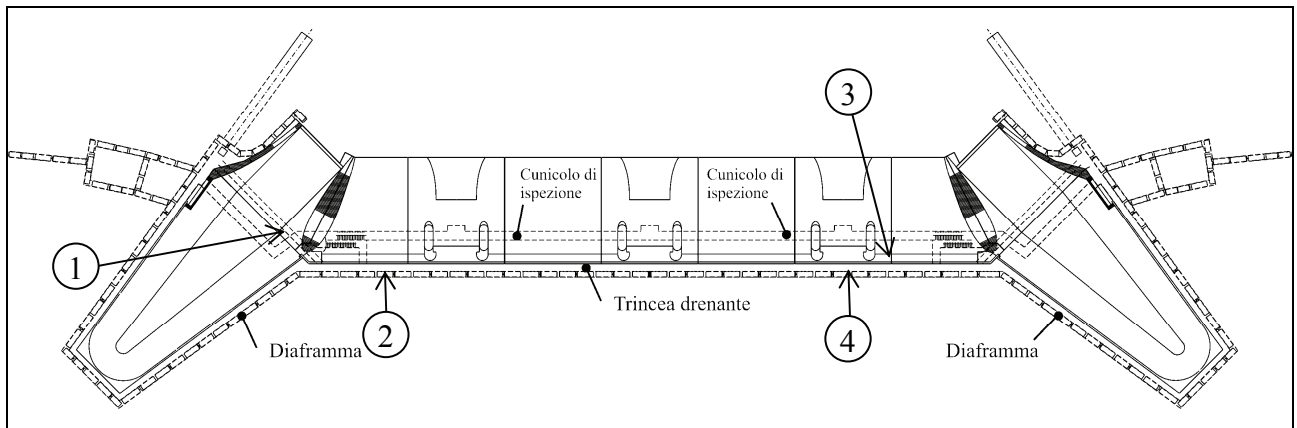


Figura 4-2 - Ubicazione delle principali perdite riscontrate nel cunicolo di drenaggio.

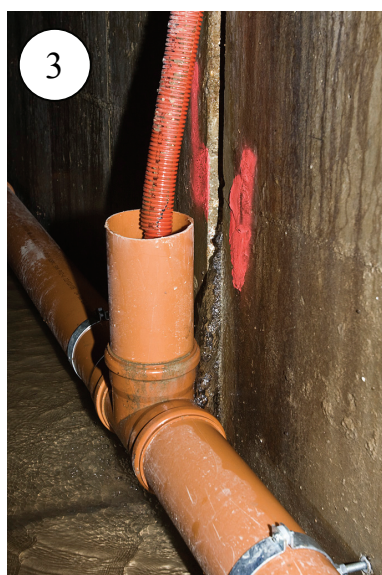


Figura 4-3 - Principali perdite riscontrate nel cunicolo di drenaggio.

Ciò è messo ancor più in evidenza dal grafico di Figura 4-4, nel quale la portata misurata è messa direttamente in relazione alla quota di invaso. E' evidente come tale legame manifesti una sensibile isteresi: a parità di quota nella cassa la portata misurata risulta molto minore nella fase di svaso che in quella di invaso. A titolo di esempio, prendendo a riferimento la quota di invaso di 100 m s.l.m., le portate misurate sono risultate pari a circa 11.5 l/s il giorno 12/04/2008 (fase crescente), mentre sono risultate di solo 5.5 l/s nella fase di svaso (giorno 02/07/2008), con una riduzione di più del 50%. Si ritiene che tale comportamento sia dovuto alla naturale sigillatura di numerose piccole perdite a seguito dell'intasamento provocato dal trascinamento di particelle fini e, ancor più, dalla formazione di concrezioni calcaree, ben evidenti in alcuni punti del cunicolo di drenaggio (Figura 4-2 punto 4).

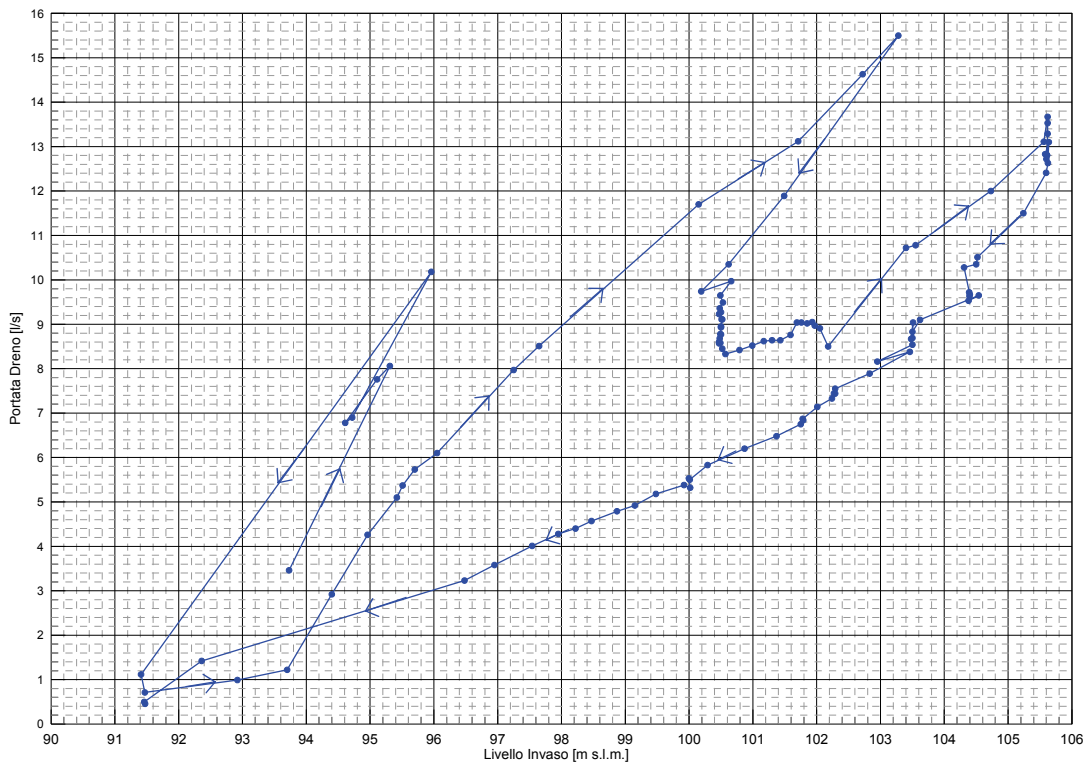


Figura 4-4 - Portate misurate al termine del cunicolo di drenaggio in funzione delle quote di invaso.

4.2. Quote piezometriche in corrispondenza della vasca di dissipazione

Le figure 4-5:4-8 riportano gli andamenti temporali delle quote piezometriche registrate ai piezometri W, X, Z e Y ubicati in corrispondenza della platea della vasca di dissipazione, assieme al corrispondente andamento delle quote di invaso.

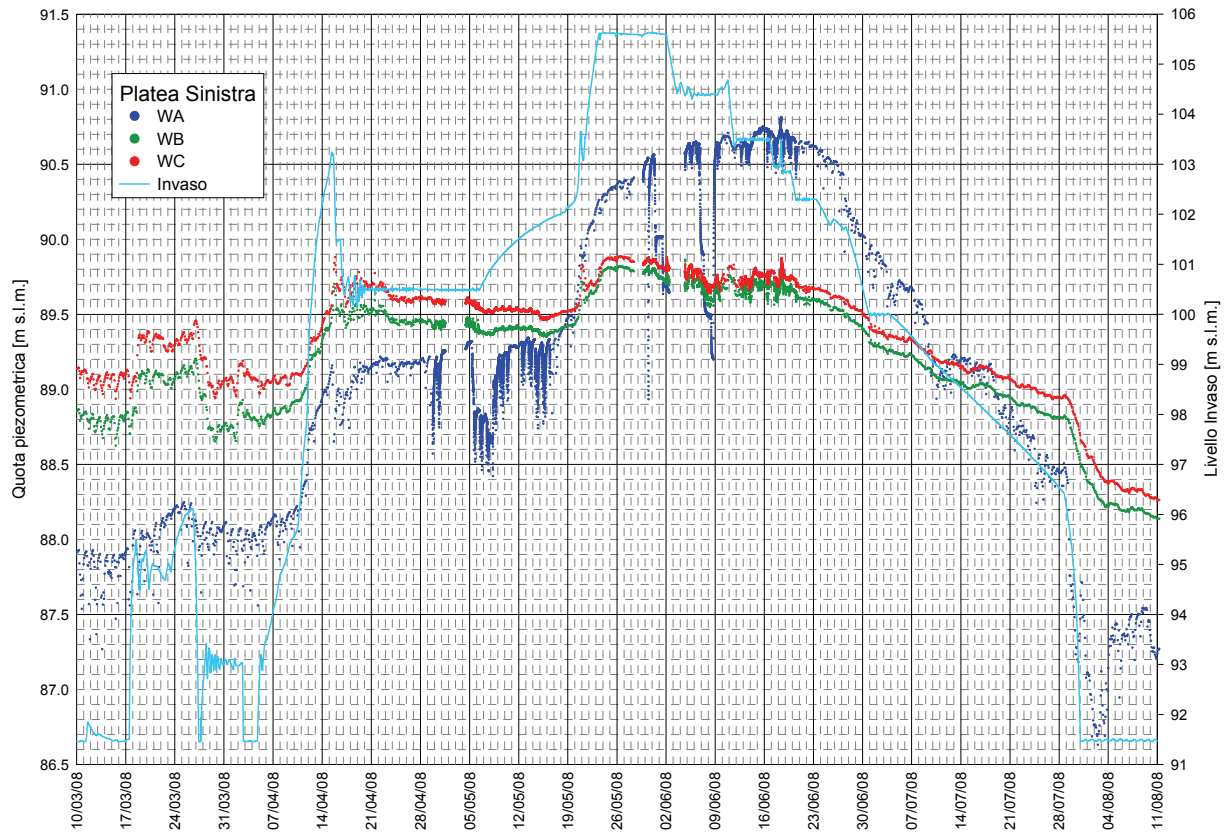


Figura 4-5 - Andamento temporale delle quote di invasore e delle quote piezometriche ai piezometri W.

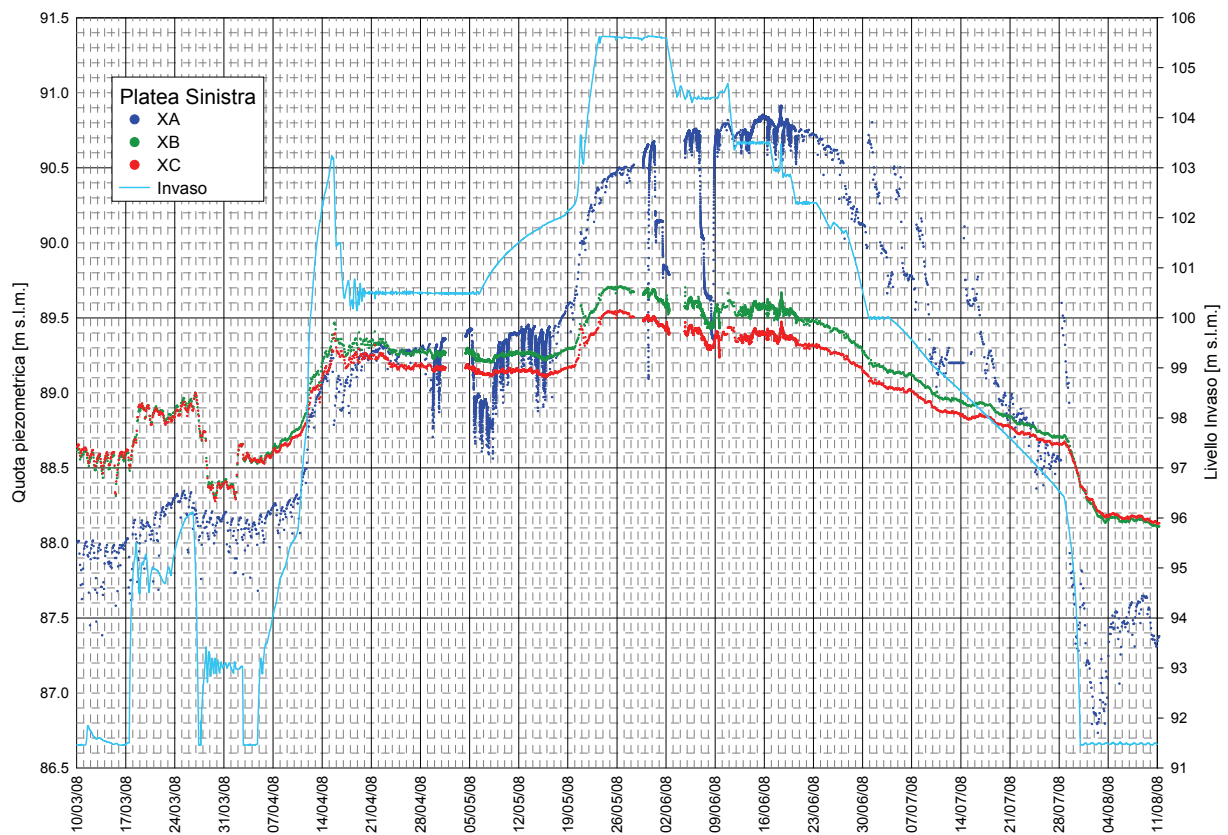


Figura 4-6 - Andamento temporale delle quote di invasore e delle quote piezometriche ai piezometri X.

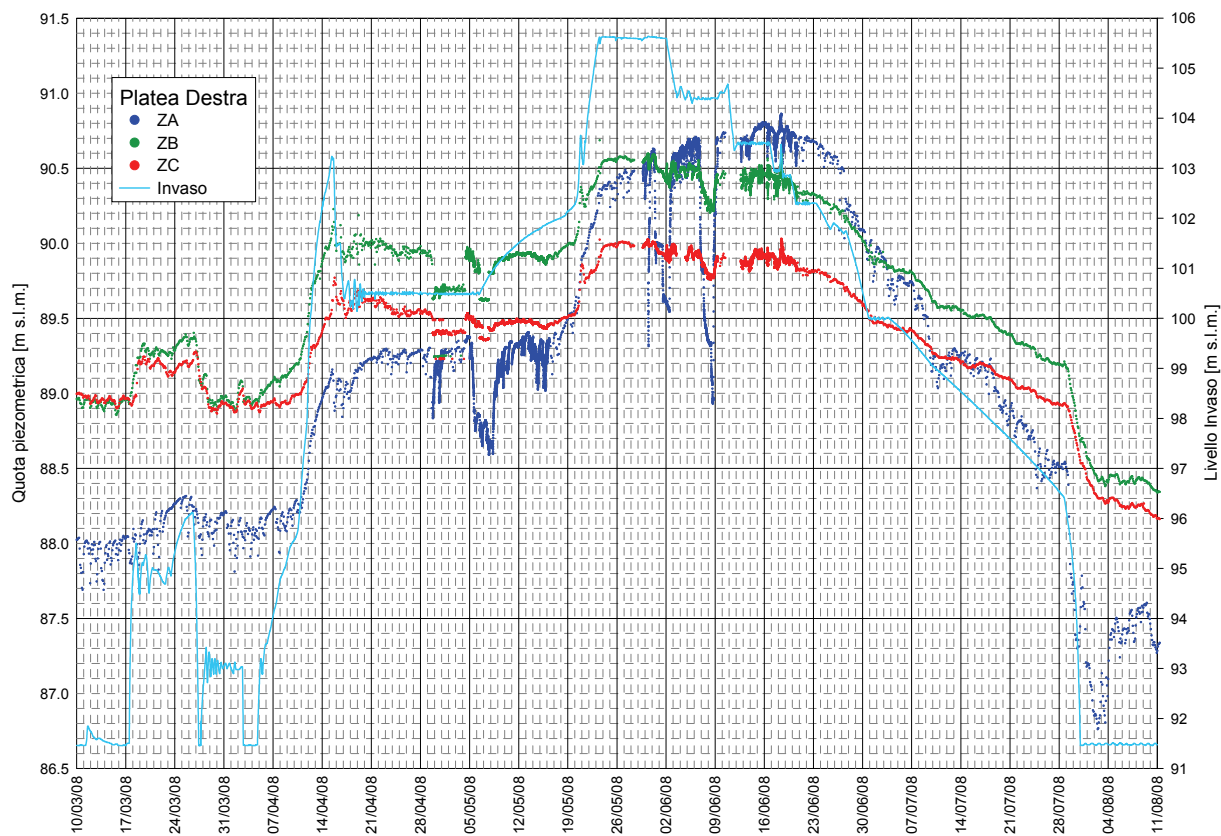


Figura 4-7 - Andamento temporale delle quote di invaso e delle quote piezometriche ai piezometri Z.

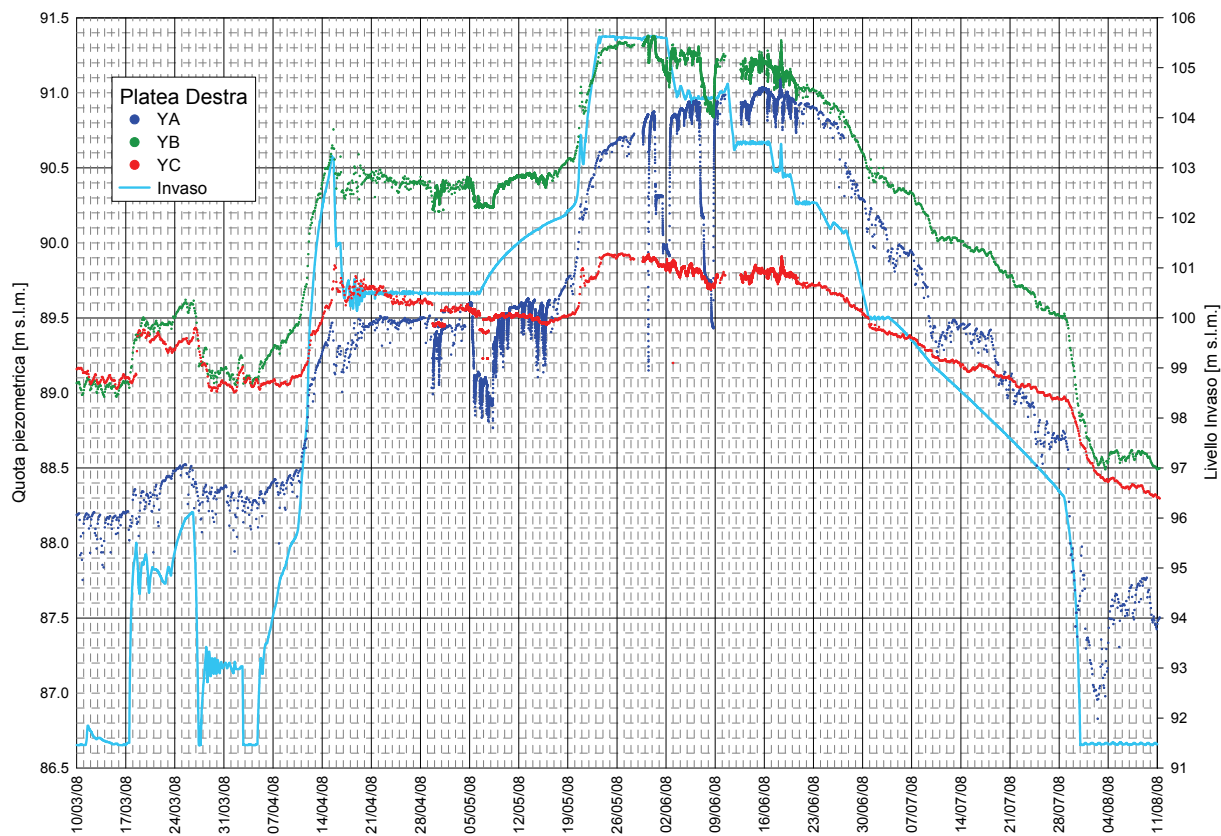


Figura 4-8- Andamento temporale delle quote di invaso e delle quote piezometriche ai piezometri Y.

Si ricorda che le lettere A, B e C individuano rispettivamente i piezometri a contatto con l'acquifero profondo (confinato superiormente dall'orizzonte argilloso), con l'acquifero superficiale (circa 10 m al di sotto del piano superiore della platea della vasca di dissipazione posto a quota 89.20 m s.l.m.) ed i piezometri scavati poco al di sotto della base della platea della vasca di dissipazione (3 m al di sotto del piano superiore della platea della vasca di dissipazione). Per l'ubicazione planimetrica dei piezometri si rimanda alla Figura 1-2. Di norma le quote piezometriche sono state acquisite con scansione bioraria; in occasione dei periodi in cui sono state effettuate le prove di pompaggio l'intervallo di acquisizione è stato ridotto a 5 minuti.

Oltre ad una evidente correlazione tra le quote di invaso e le quote piezometriche i grafici mostrano alcuni comportamenti peculiari, di seguito elencati per punti.

1. Le quote piezometriche registrate dai piezometri profondi (lettera A) mostrano sensibili abbassamenti ogniqualvolta entra in funzione la pompa dell'impianto di sollevamento del vicino cementificio, posto in sponda destra. Con l'acquisizione delle quote piezometriche a scansione bioraria gli abbassamenti e le successive risalite sembrano assumere un andamento casuale, ma non appena si aumenta la frequenza di campionamento essi si manifestano molto chiaramente, come si può notare ad esempio nel periodo 30 aprile-15 maggio. Poiché le risalite sono piuttosto rapide (si ricorda che l'acquifero è in pressione) le quote piezometriche indisturbate dell'acquifero profondo possono ragionevolmente dedursi dall'involuppo dei valori giornalieri più alti. Dai diagrammi si nota anche che il piezometro XA ha smesso di funzionare correttamente a partire dalla fine di giugno.
2. Durante tutto il periodo di svolgimento degli invasi sperimentali le escursioni di quota piezometrica più accentuate si sono registrate in corrispondenza dei piezometri profondi, con variazioni dell'ordine dei 3 metri (da circa 88 a 91 m s.l.m.); molto meno pronunciate sono state le escursioni in corrispondenza dei piezometri superficiali, con variazioni dell'ordine del metro o poco più e valori massimi mai superiori a 90 m s.l.m.. I piezometri a profondità intermedia, a contatto sempre con l'acquifero superficiale, hanno mostrato variazioni intermedie. Si ritiene che le modeste escursioni in corrispondenza dei piezometri superficiali possano essere ascritte alla presenza del cunicolo di drenaggio, che costituisce una condizione al contorno per le quote piezometriche dell'acquifero superficiale a quota pari a circa 88 m s.l.m. ed alla non perfetta sigillatura dei giunti delle piastre costituenti il pavimento della vasca di dissipazione, che consentono alle portate di filtrazione di trapelare nella vasca stessa, nella quale la quota della superficie libera (a paratoie chiuse) è posta a circa 90 m s.l.m..

3. I piezometri intermedi in corrispondenza della parte destra della platea (ZB e soprattutto YB) hanno registrato quote piezometriche nettamente superiori a quelle degli analoghi piezometri posti nella parte sinistra (XB e WB). Ciò è messo ben in evidenza dalla Figura 4-10, dove sono riportati gli andamenti dei soli piezometri intermedi (B). Si apprezzano differenze di quasi due metri tra i valori registrati al piezometro YB (destra) e quelli contemporaneamente registrati al piezometro XB (sinistra). Ritornando ad osservare la Figura 4-8 si nota che il piezometro YB ha sempre registrato quote piezometriche superiori sia a quelle del piezometro profondo YA che a quelle del piezometro superficiale YC, ubicati planimetricamente nel medesimo punto. Escludendo un malfunzionamento del piezometro, questo comportamento può essere spiegato solo ipotizzando un collegamento diretto tra l'invaso e l'acquifero superficiale attraverso il diaframma di monte, che quindi deve presentare una qualche discontinuità o deve non essere ben intestato nel sottostante orizzonte argilloso. Per verificare l'effettivo approfondimento del diaframma e fugare ogni dubbio sul comportamento del sistema in corrispondenza della parte destra del manufatto è stato eseguito nell'Agosto 2008 un sondaggio da parte della società PARMAGEO, su commissione dell'AIPO. Il sondaggio è stato realizzato in corrispondenza del punto 4 di Figura 4-2 ed ha effettivamente evidenziato che alla base del diaframma, che si approfondisce fino a -20.5 m dal piano della platea di monte (91 m s.l.m.), sia presente almeno 1.5 m di materiale non completamente impermeabile (Figura 4-9).



Figura 4-9- Particolare del sondaggio F4 da m 20 a m 22.

Del resto, la risposta anomala del piezometro Y, ed in generale di tutta la parte destra della platea della vasca di dissipazione, era già stata messa in evidenza nelle precedenti prove di invaso, ed era stata proprio quella che aveva destato qualche preoccupazione circa la stabilità al sollevamento delle piastre costituenti il pavimento della vasca. A conforto di questa stabilità vi sono ora le registrazioni ai piezometri superficiali C, raggruppate nella Figura 4-11, assieme alle registrazioni agli altri piezometri superficiali posti in corrispondenza della platea (Figura 4-12 e Figura 4-13). Tutte le misure confermano come non si sia mai superata la quota piezometrica di 90 m s.l.m., ben al di sotto del valore limite per la stabilità delle piastre. A conferma di ciò nelle Figura 4-14 e Figura 4-15 si riportano i grafici degli andamenti delle quote piezometriche di tutti i piezometri sottoplatea (in destra e sinistra idraulica) in funzione delle quote di invaso. Nelle figure sono anche riportati i valori limite di quota piezometrica che consentono di mantenere un coefficiente di sicurezza al sollevamento pari a 1.3 ed 1.0 nell'ipotesi ulteriormente cautelativa di vasca di dissipazione completamente vuota (assenza del cuscino d'acqua stabilizzante). Come si nota le quote piezometriche massime misurate sottoplatea, anche in questa situazione particolarmente cautelativa, garantiscono coefficienti di sicurezza al sollevamento sempre superiori ad 1.3.

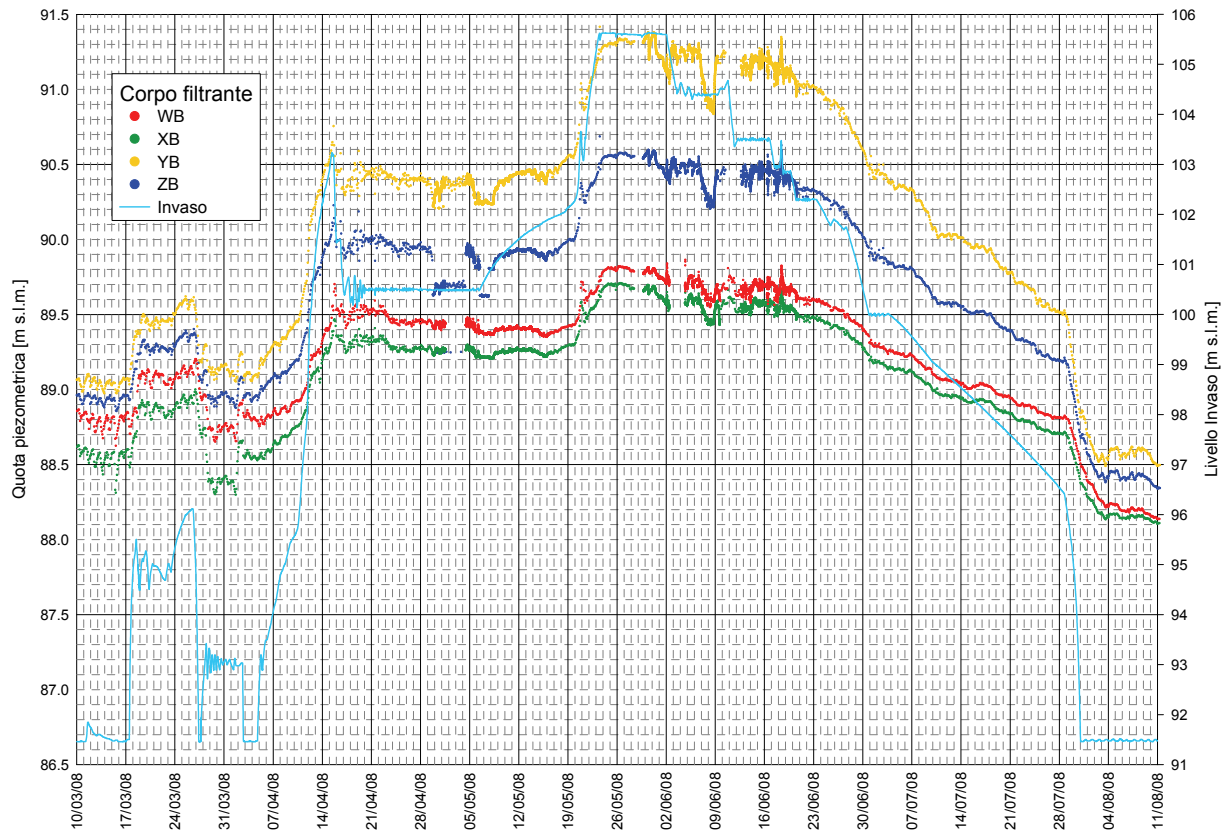


Figura 4-10- Andamento temporale delle quote di invasio e delle quote piezometriche ai piezometri intermedi B.

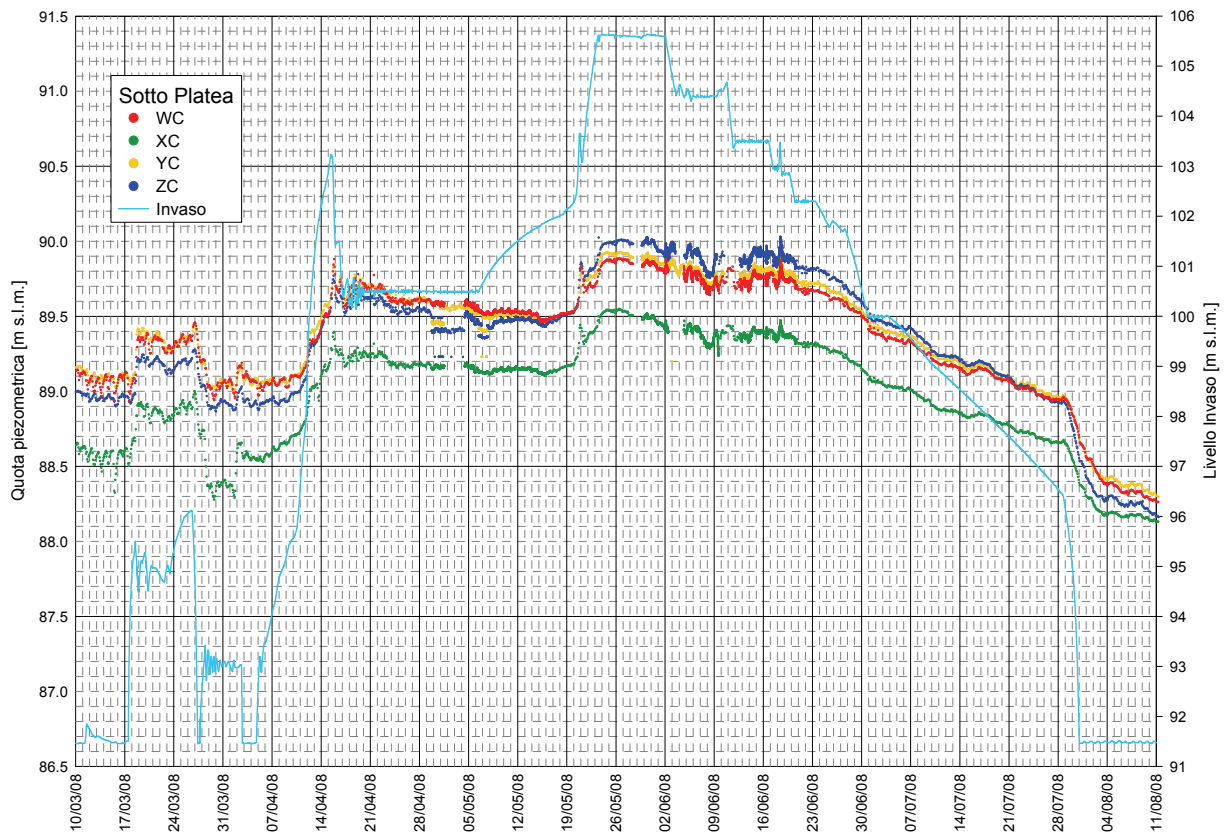


Figura 4-11- Andamento temporale delle quote di invasio e delle quote piezometriche ai piezometri superficiali C.

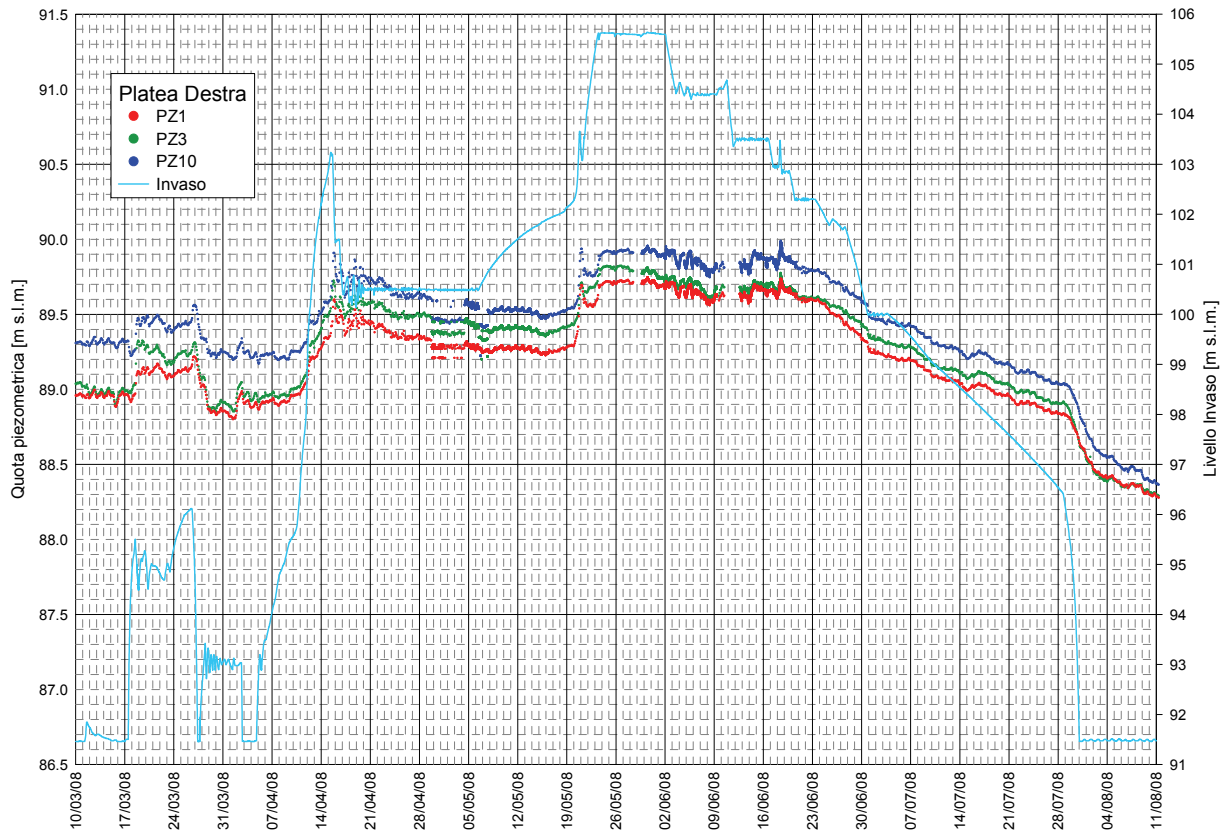


Figura 4-12- Andamento temporale delle quote di invaso e delle quote piezometriche ai piezometri superficiali PZ1, PZ3, PZ10 (platea destra).

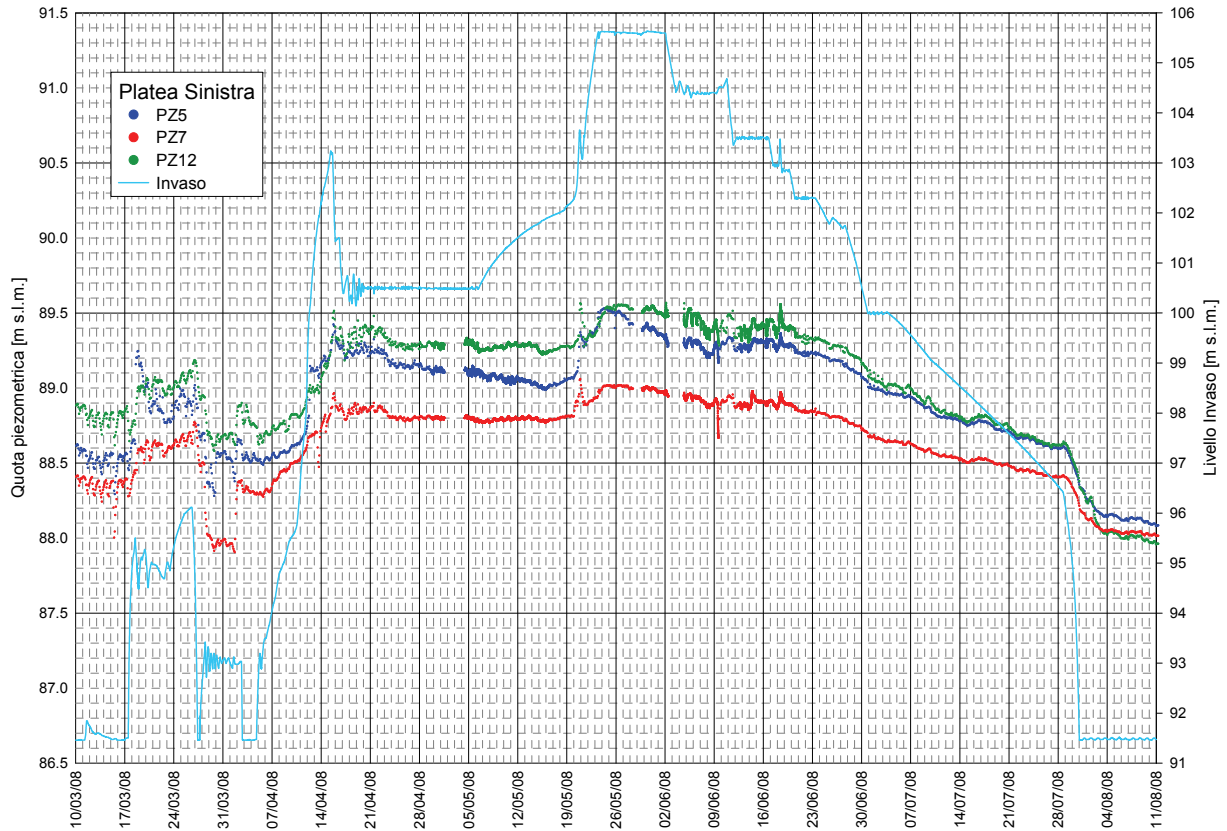


Figura 4-13- Andamento temporale delle quote di invaso e delle quote piezometriche ai piezometri superficiali PZ5, PZ7, PZ12 (platea sinistra).

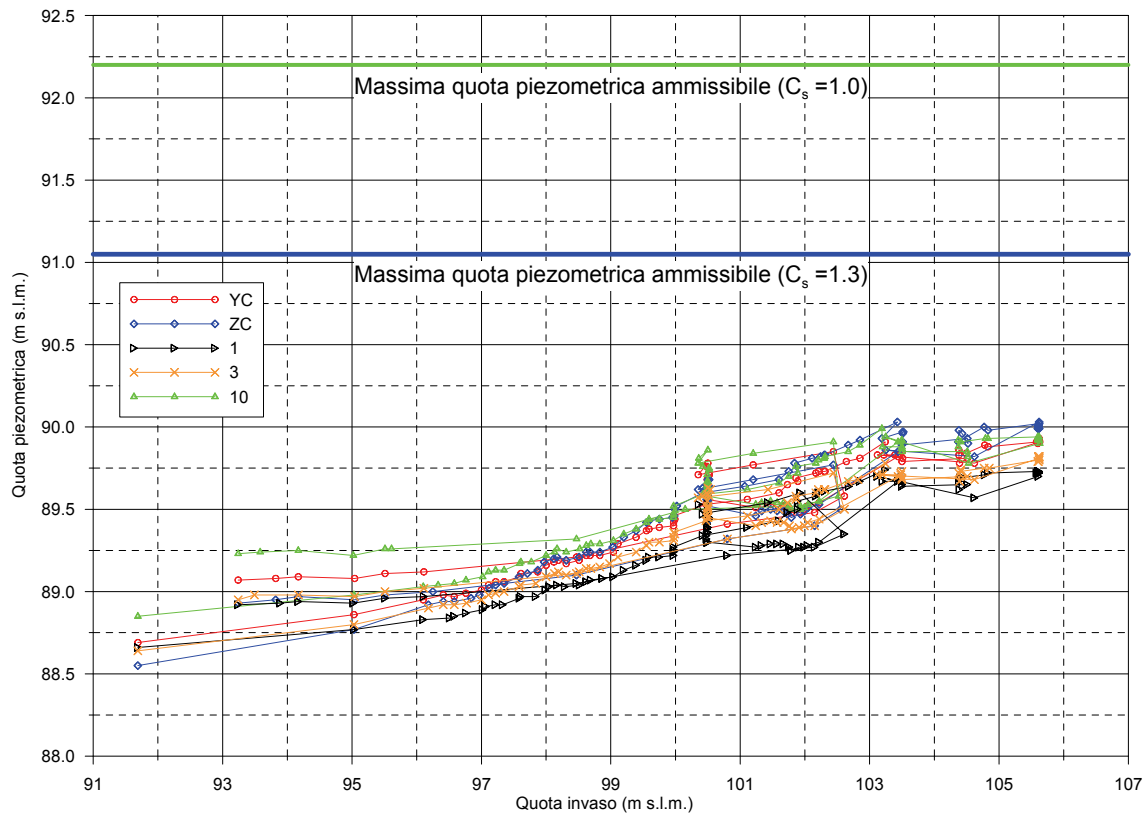


Figura 4-14- Quote piezometriche sottoplatea in funzione delle quote di invaso (platea destra).

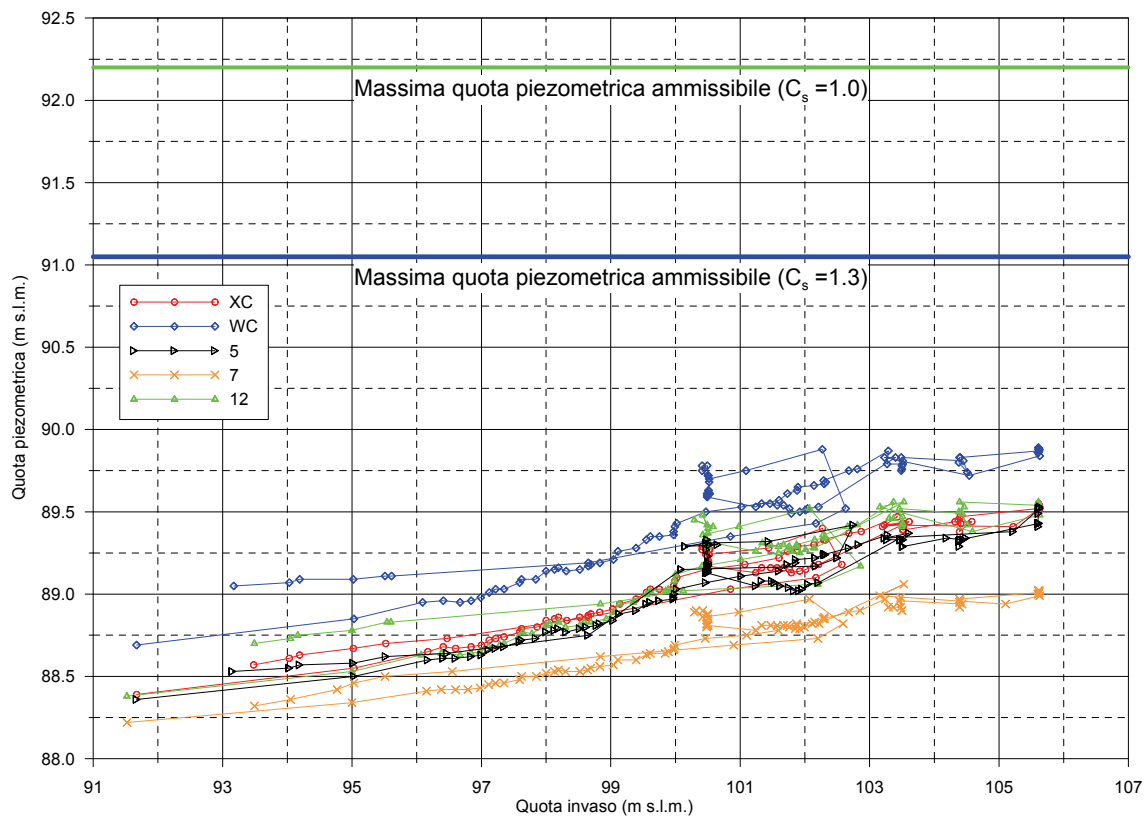


Figura 4-15-Quote piezometriche sottoplatea in funzione delle quote di invaso (platea sinistra).

4. Gli abbassamenti indotti nell'acquifero profondo si risentono immediatamente, pur se attenuati, anche nell'acquifero superficiale. Questo comportamento è messo ben in evidenza dalle Figure 4-16:4-18 che riportano l'andamento registrato delle quote piezometriche, con scansione pari a 5 minuti, durante la prova di pompaggio effettuata nei giorni 6-7-8 giugno 2008. La Figura 4-16 riporta gli andamenti registrati ai piezometri profondi ZA ed YA; la Figura 4-17 riporta gli analoghi andamenti registrati ai piezometri intermedi ZB e YB, mentre la Figura 4-18 riporta gli andamenti registrati ai piezometri superficiali posti nella parte destra della platea (compresi i piezometri ZC e YC). Si nota come gli abbassamenti (e la relativa risalita) in corrispondenza dell'acquifero profondo siano ancora ben evidenti, per quanto molto attenuati, in corrispondenza dei piezometri intermedi ed anche in quelli superficiali. Questo comportamento è indice di un collegamento diretto tra acquifero profondo ed acquifero superficiale in corrispondenza della zona della platea della vasca di dissipazione; è probabile quindi che l'orizzonte argilloso, che dovrebbe costituire la separazione tra i due acquiferi, non sia continuo o si riduca ad uno strato molto sottile, non sufficiente ad impedire gli scambi tra acquifero profondo e superficiale. Nella Figura 4-16 e nella Figura 4-18 è anche riportato l'andamento del grado di apertura della Paratoia 2 durante il medesimo periodo (le Paratoie 1 e 3 erano completamente chiuse). Si nota, soprattutto nei piezometri intermedi ed in quelli superficiali (ma in minima parte anche in quelli profondi) un aumento pressoché istantaneo delle quote piezometriche registrate quando la paratoia viene aperta. Un simile comportamento potrebbe essere causato dall'aumento del livello idrico nella vasca di dissipazione necessario per allontanare nell'alveo di valle la portata effluente a seguito dell'apertura della paratoia. Se è vero che il flusso di filtrazione è diretto verso l'alto, come si deduce da quanto esposto al precedente punto 2, tale aumento si configura come un innalzamento della pressione sul fondo della vasca di dissipazione che si propaga poi rapidamente nell'acquifero sottostante ed, in parte, anche in quello profondo. L'andamento di questi innalzamenti lascia però molti dubbi e non si esclude che possa essere dovuto ad un funzionamento anomalo dei piezometri indotto dalle vibrazioni.

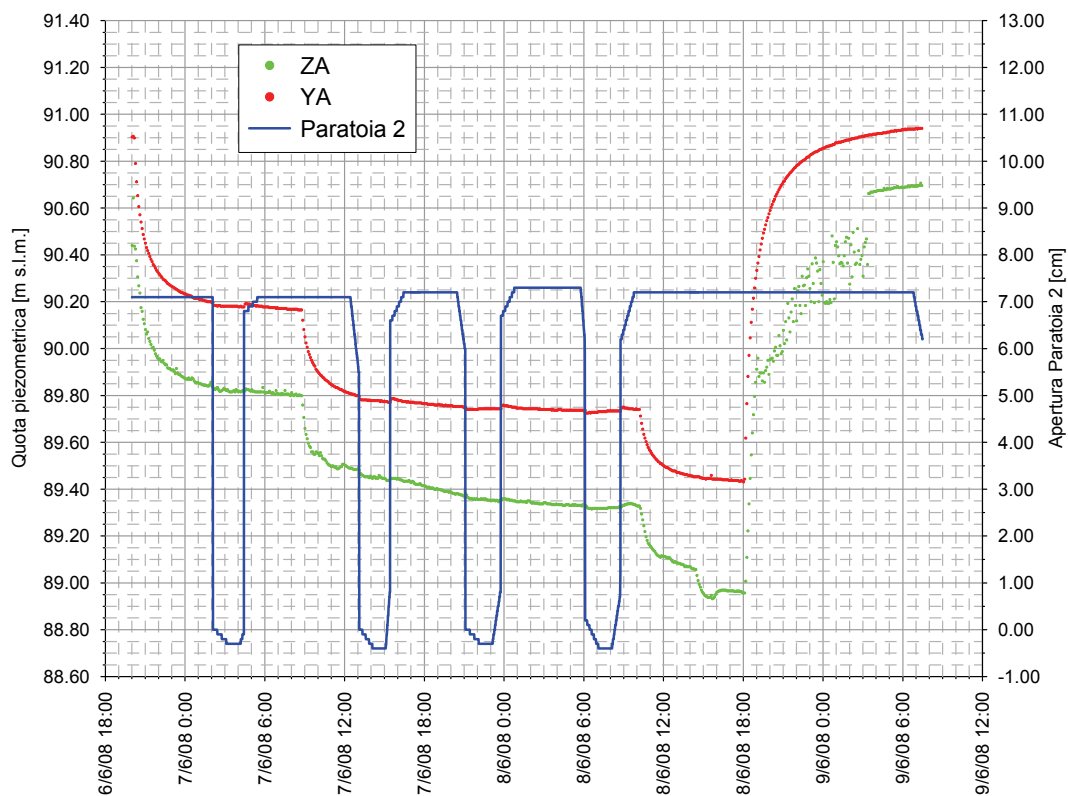


Figura 4-16- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri profondi ZA e YA durante le prove di pompaggio.

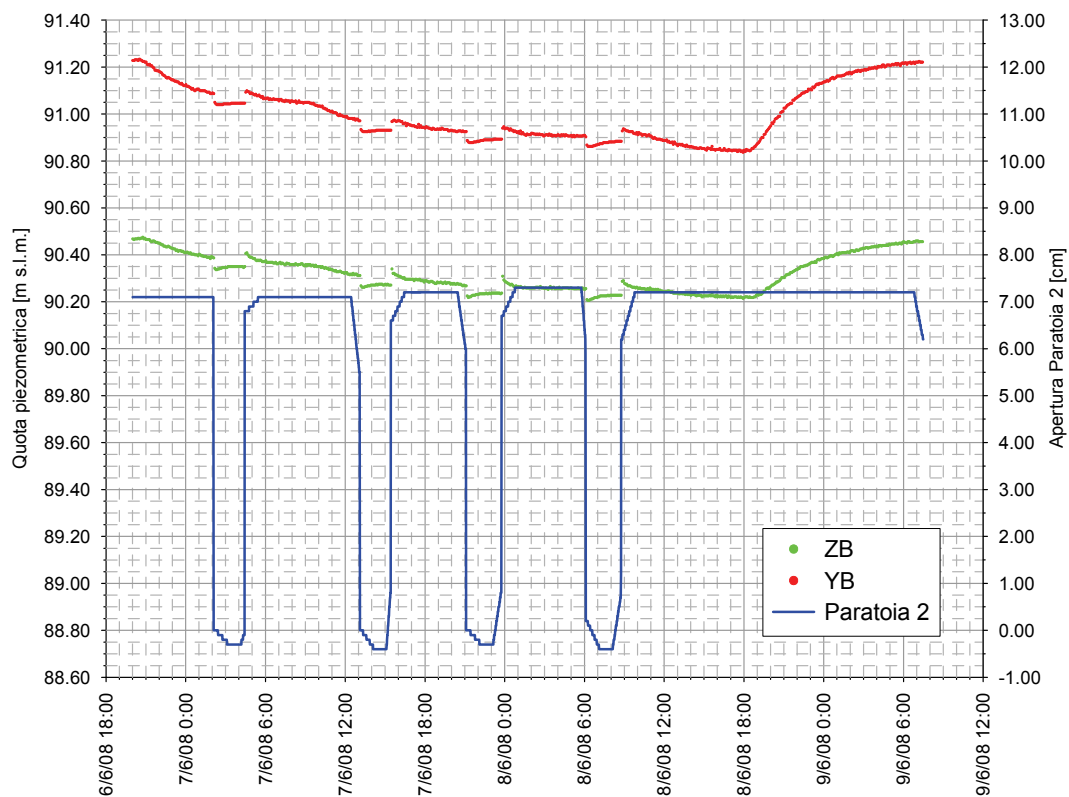


Figura 4-17- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri intermedi ZB e YB durante le prove di pompaggio.

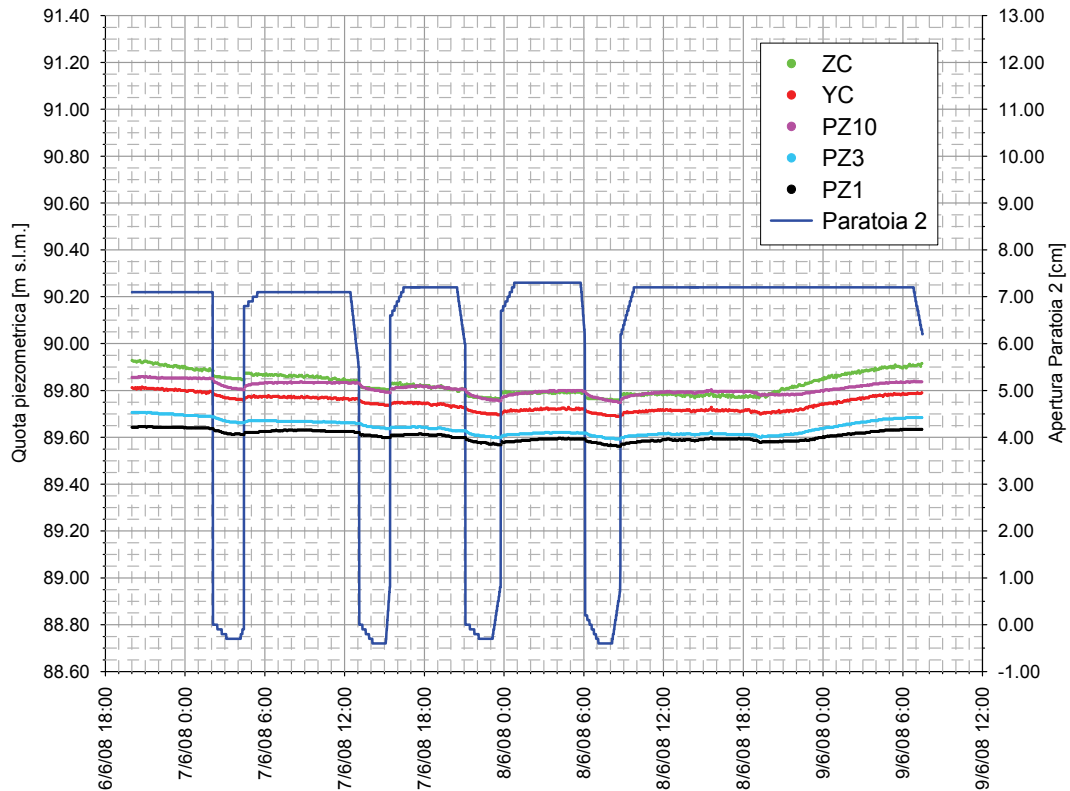


Figura 4-18- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri superficiali ZC, YC, PZ1, PZ3 e PZ10 durante le prove di pompaggio.

In conclusione, tutte le misure effettuate durante le prove di invaso e le considerazioni precedenti fanno ritenere che vi sia un collegamento diretto tra invaso e acquifero superficiale, soprattutto nella parte destra del manufatto e che l'acquifero profondo non sia completamente separato da quello superficiale. La presenza del cunicolo di drenaggio e, presumibilmente, dei giunti non completamente sigillati tra le piastre costituenti il pavimento della vasca di dissipazione limitano comunque le quote piezometriche sottoplatea a valori non superiori a 90 m s.l.m., garantendo coefficienti di sicurezza al sollevamento delle piastre sempre abbondantemente superiori ad 1.3.

4.3. Quote piezometriche in corrispondenza degli argini

La Figura 4-19 e la Figura 4-20 riportano gli andamenti temporali delle quote piezometriche registrate ai piezometri posti rispettivamente al piede esterno dell'argine destro e dell'argine sinistro, assieme al corrispondente andamento delle quote di invaso. Per l'ubicazione planimetrica dei piezometri si rimanda alla Figura 1-3 (arginatura destra) e alla Figura 1-4 (arginatura sinistra).

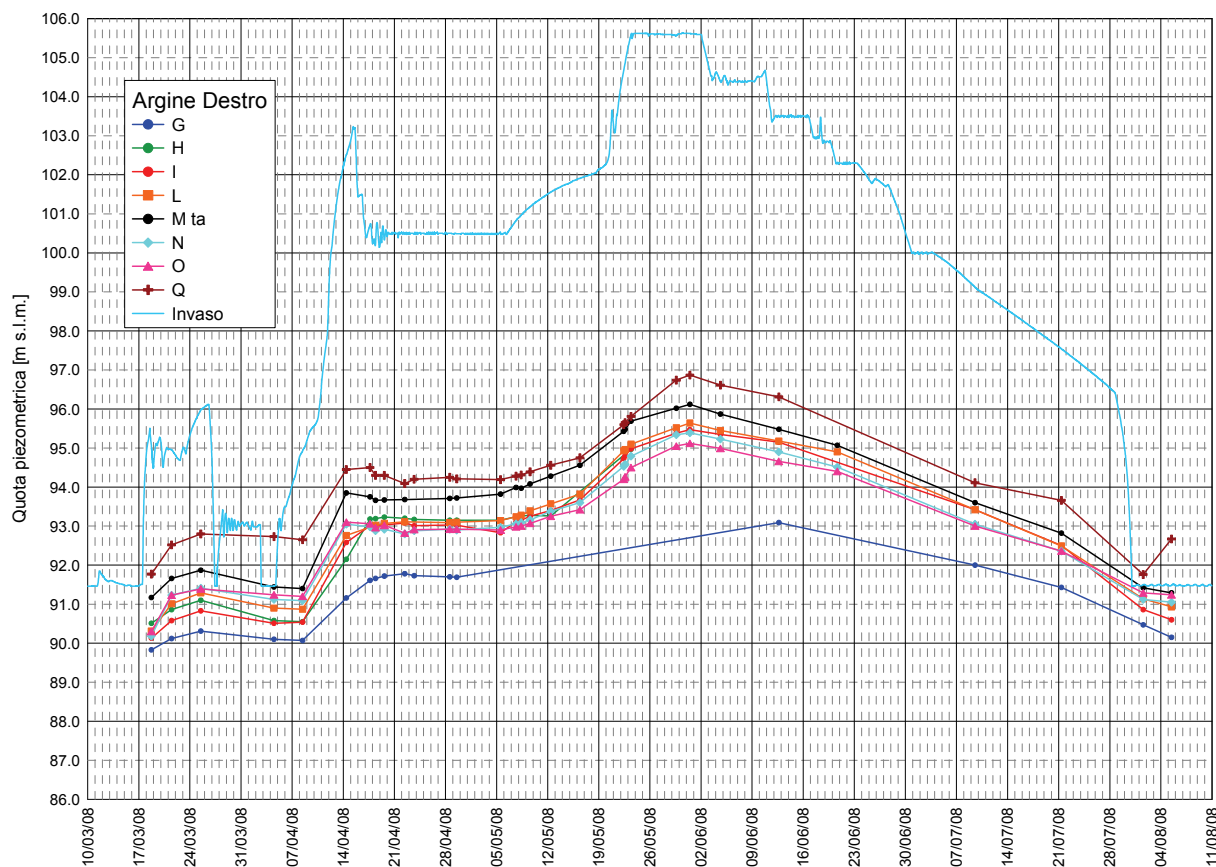


Figura 4-19- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri posti alla base dell'argine destro.

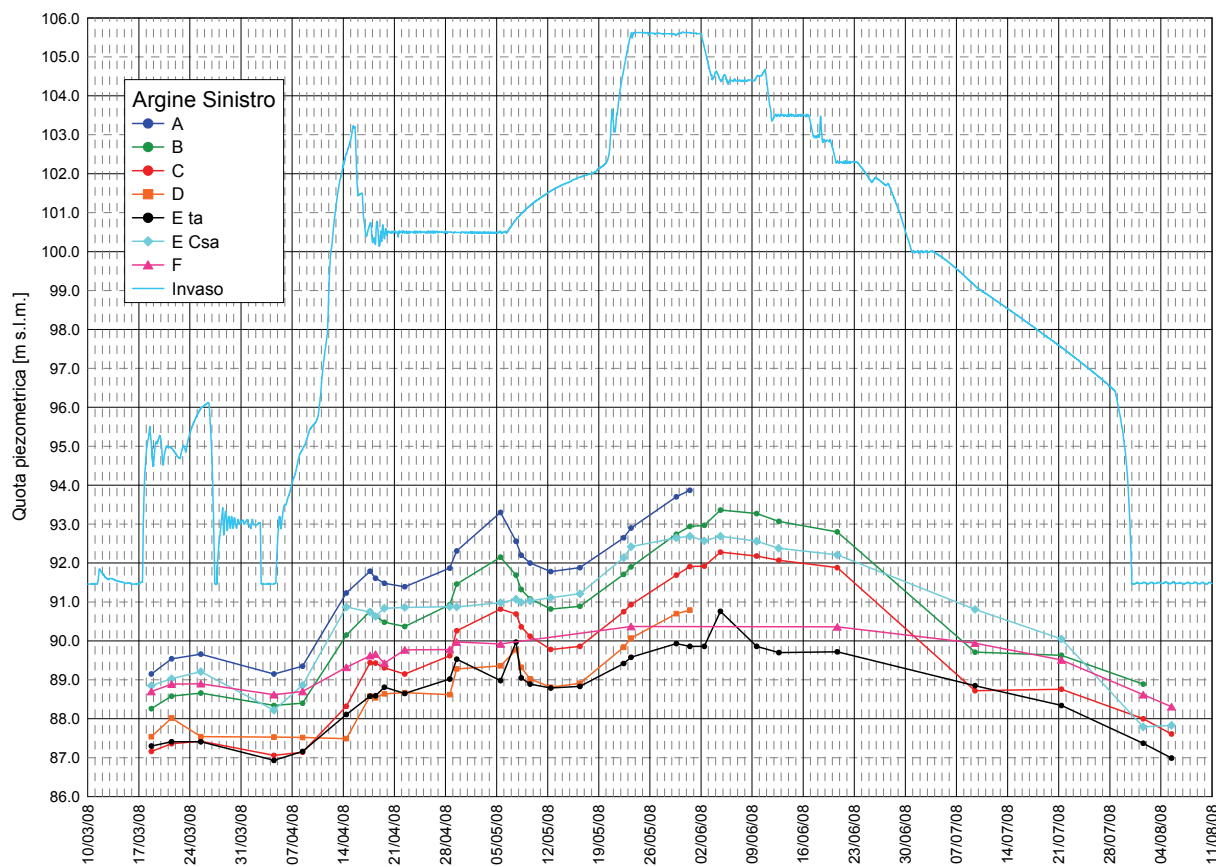


Figura 4-20- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri posti alla base dell'argine sinistro.

Poiché i piezometri non sono strumentati, le misure sono state effettuate manualmente mediante freatimetro con cadenza variabile a seconda delle variazioni idrometriche dell'invaso ma mediamente con due misure a settimana, almeno nella fase crescente dei livelli nella cassa. Il piezometro A, posto al piede dell'argine sinistro, non è stato più monitorato a partire dal 30 maggio 2008, a causa della venuta d'acqua a cui si è già fatto cenno nel Capitolo 3 (punto 5 di Figura 3-2) che ha richiesto interventi di confinamento mediante realizzazione di una coronella in terra. I medesimi interventi hanno reso inagibile anche il piezometro D, che quindi non è stato più osservato a partire dalla stessa data. L'analisi degli andamenti temporali delle quote piezometriche indica variazioni sostanzialmente in fase con le quote di vaso, con escursioni massime tra l'inizio delle prove ed il colmo non superiori a 4-5 metri. La minima soggiacenza rispetto alla corrispondente quota del piano campagna, pari a circa 2 metri (in destra) e a 4 metri (in sinistra) appare rassicurante nei riguardi della tenuta dei diaframmi e dei nuclei impermeabili degli argini.

La Figura 4-21 riporta gli andamenti temporali delle quote piezometriche registrate ai piezometri I2-L2-M2-N2-O2-P2-Q2, assieme al corrispondente andamento delle quote di vaso.

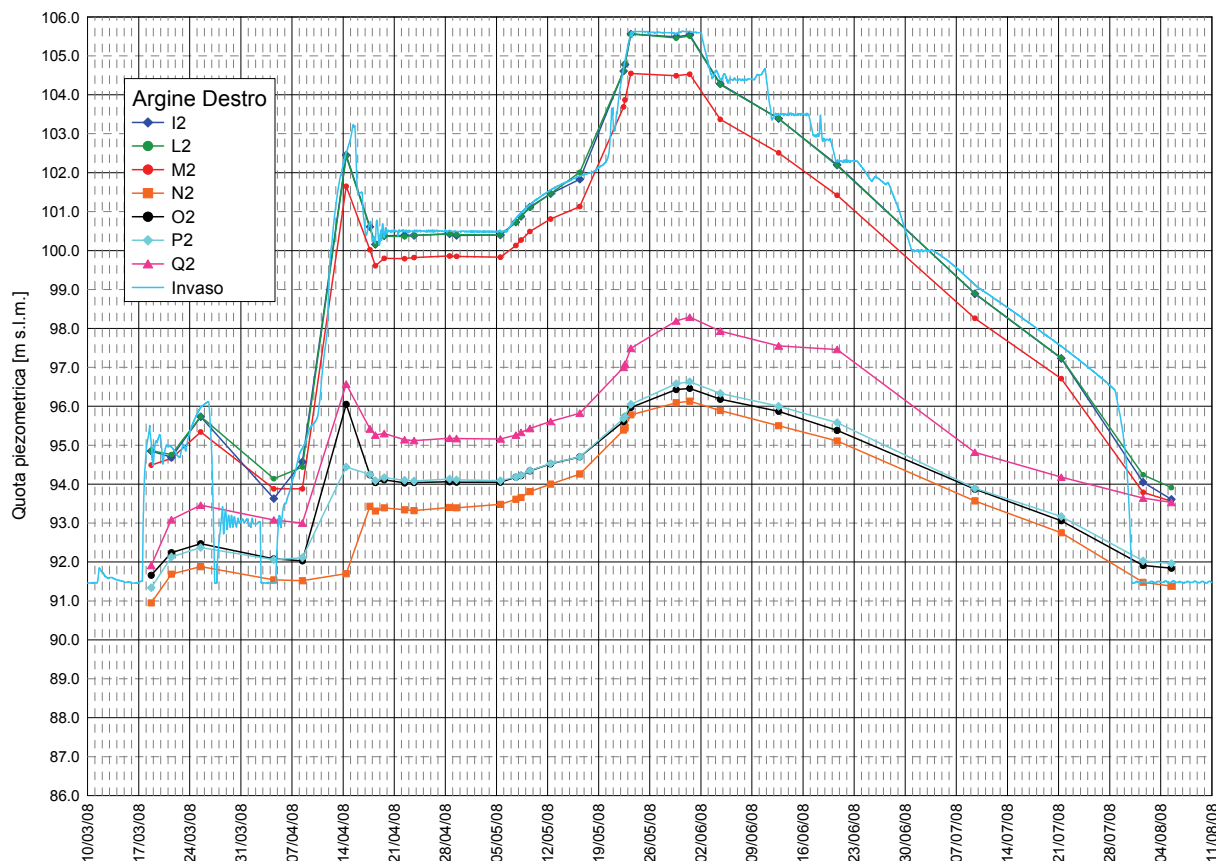


Figura 4-21-Andamento delle quote piezometriche ai piezometri posti al coronamento dell'argine destro.

Tali piezometri, scavati in corrispondenza del limite esterno del coronamento dell'argine destro (cfr. Figura 1-3), si approfondiscono di circa 23.5 metri al di sotto della quota del coronamento medesimo (110.10 m s.l.m.) e sono, a parte il primo e l'ultimo metro, completamente finestrati. Dal confronto tra la loro collocazione planimetrica e le sezioni arginali di progetto si evince che essi dovrebbero essere ubicati a valle del diaframma di tenuta. Dai diagrammi mostrati in Figura 4-21 risulta che i piezometri I2, L2 e M2 hanno seguito, con modeste differenze e senza apprezzabili ritardi, l'andamento delle quote di invaso, mentre gli altri (N2, O2, P2 e Q2) hanno invece registrato quote piezometriche sensibilmente più basse ed in linea con quanto ci si potrebbe aspettare da piezometri scavati a valle del diaframma di tenuta.

Per comprendere meglio le differenze di comportamento, nelle Figure 4.21-4.26 sono riportati gli andamenti temporali delle quote piezometriche registrate ai piezometri posti lungo le sei sezioni denominate I, L, M, N, O e Q. Si ricorda che con la denominazione senza suffisso si identificano i piezometri posti al piede esterno dell'argine, con il suffisso "1" quelli scavati in corrispondenza della banca intermedia (posta circa a quota 104-105 m s.l.m.), con il suffisso "2" quelli in corrispondenza del limite esterno del coronamento arginale e con il suffisso "3" quelli in corrispondenza dell'asse del coronamento stesso. Questi ultimi, completamente finestrati, si approfondiscono solo fino a quota 99 m s.l.m., ovvero dovrebbero terminare ancora all'interno del nucleo impermeabile.

Dalle Figure 4-22:4-24, riportanti gli andamenti delle quote piezometriche lungo le sezioni I, L e M, emergono le seguenti considerazioni:

1. i piezometri L3 e M3 hanno misurato, in tutta la fase iniziale delle prove di invaso e fino alla metà di aprile, quote piezometriche ben superiori alle contemporanee quote di invaso (il piezometro I3 non è mai stato realizzato);
2. i piezometri I2, L2 e M2 hanno, come già detto, sostanzialmente seguito le quote dell'invaso;
3. i piezometri L1 e M1 (sulla banca) hanno registrato quote piezometriche piuttosto basse, ben soggiacenti non solo alla quota della banca stessa ma anche a quella del piano campagna (il piezometro I1 non è mai stato realizzato);
4. analogo comportamento hanno manifestato, come già detto, i piezometri I, L ed M, posti al piede esterno dell'argine.

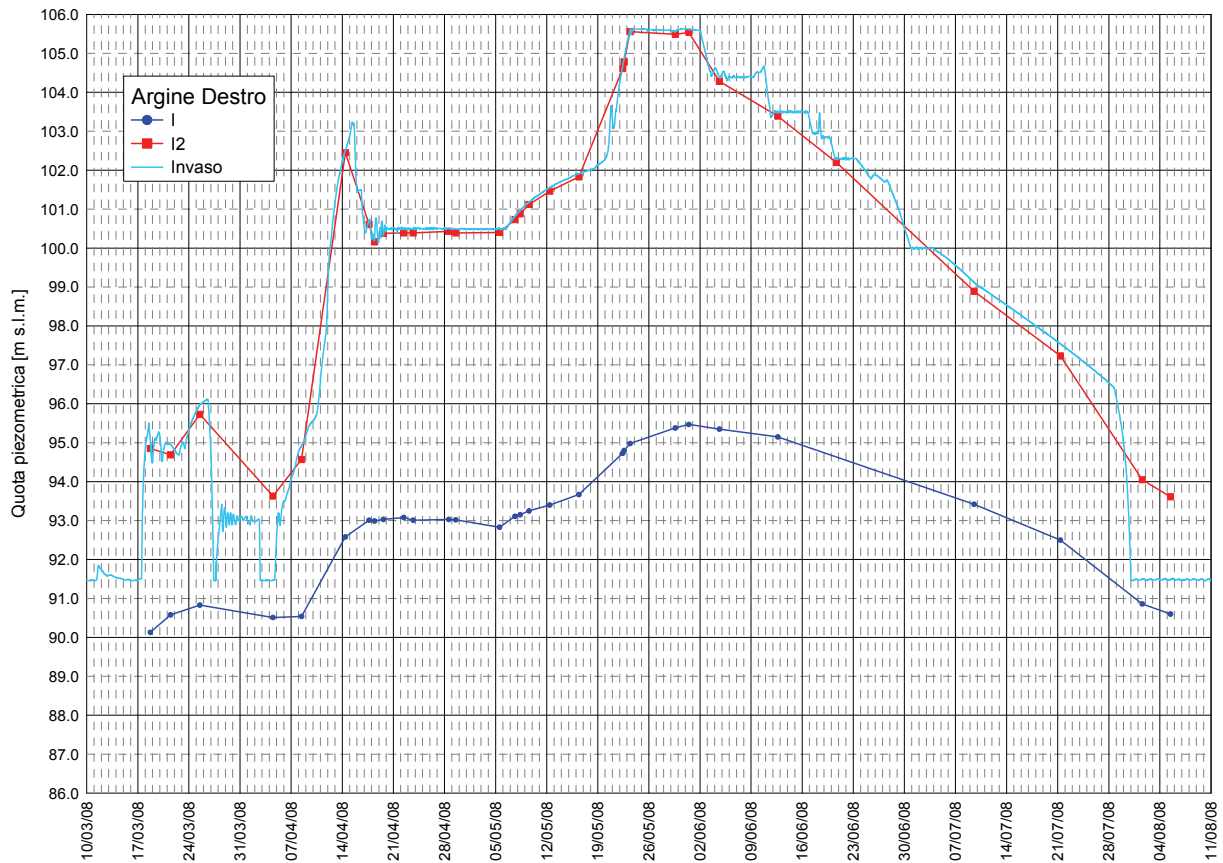


Figura 4-22- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri posti sull'argine destro lungo la sezione I.

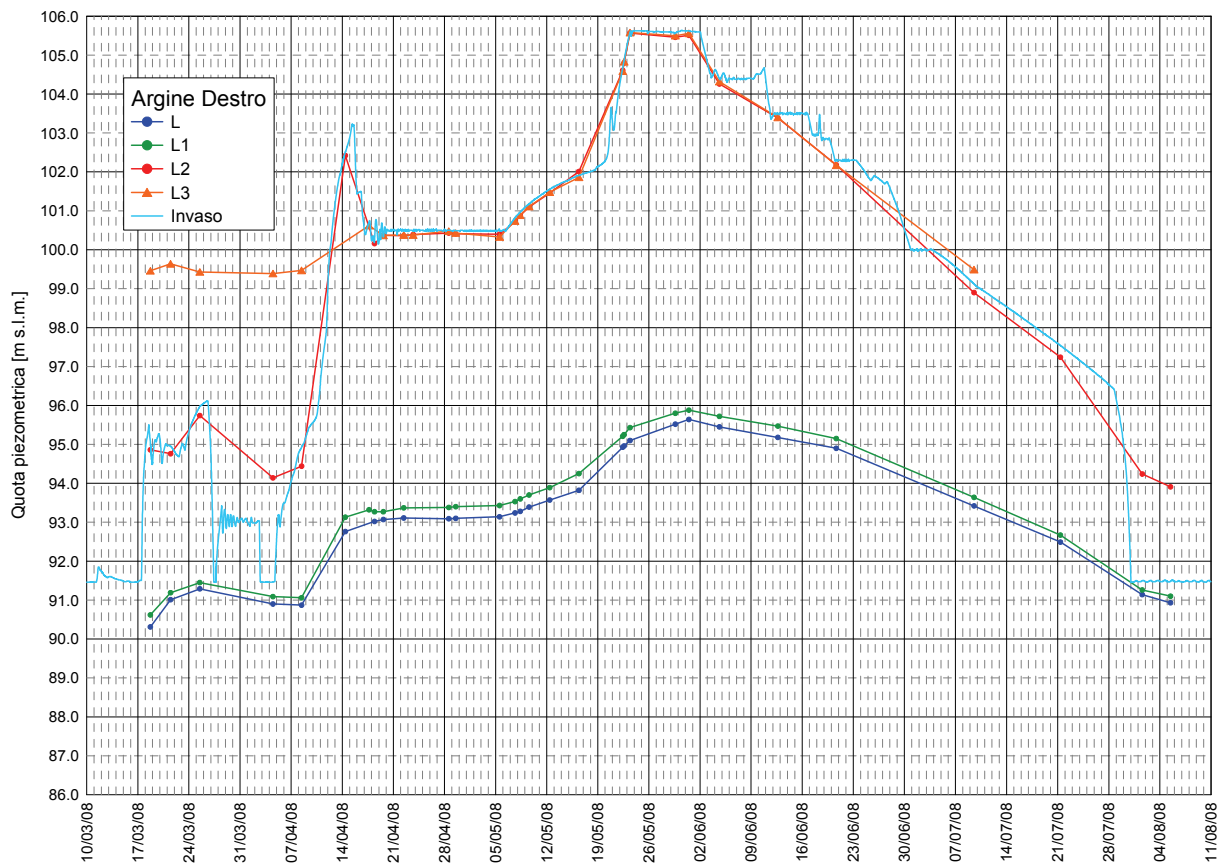


Figura 4-23- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri posti sull'argine destro lungo la sezione L.

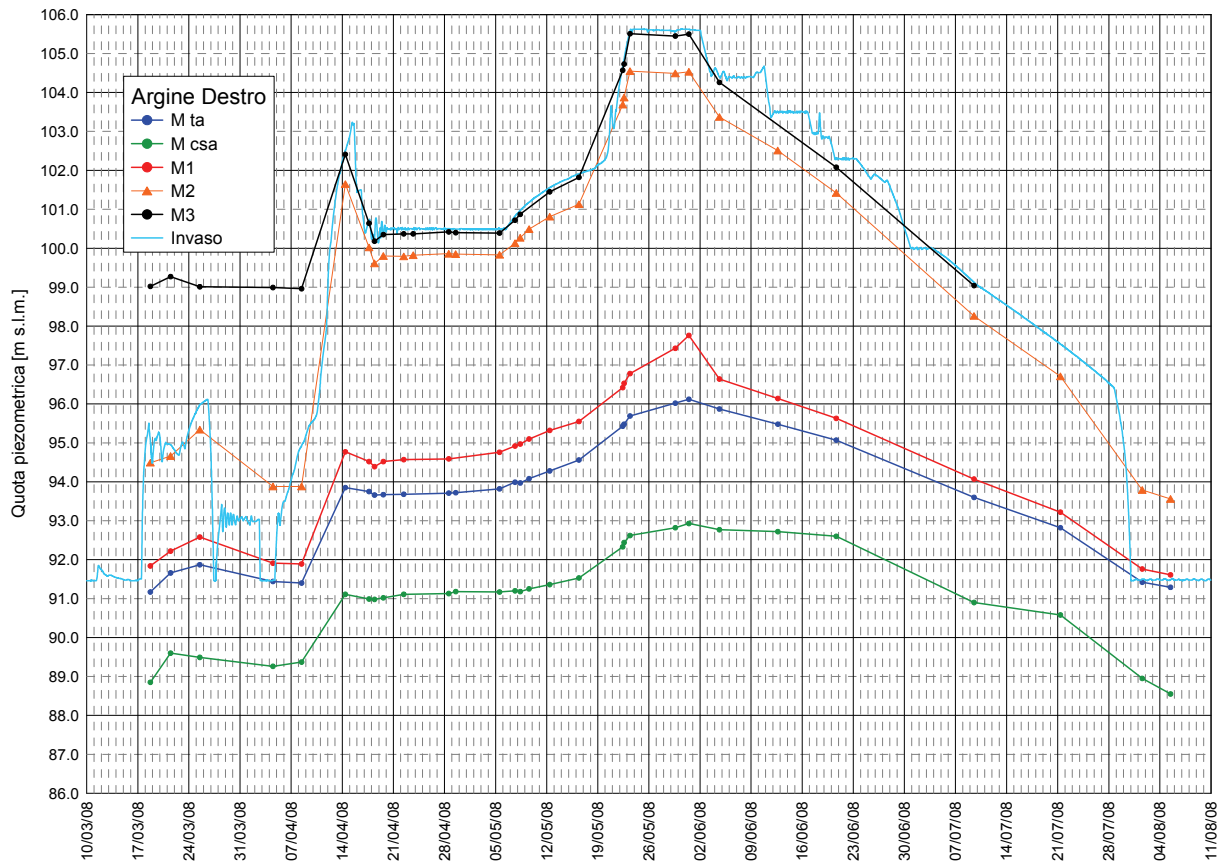


Figura 4-24- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri posti sull'argine destro lungo la sezione M.

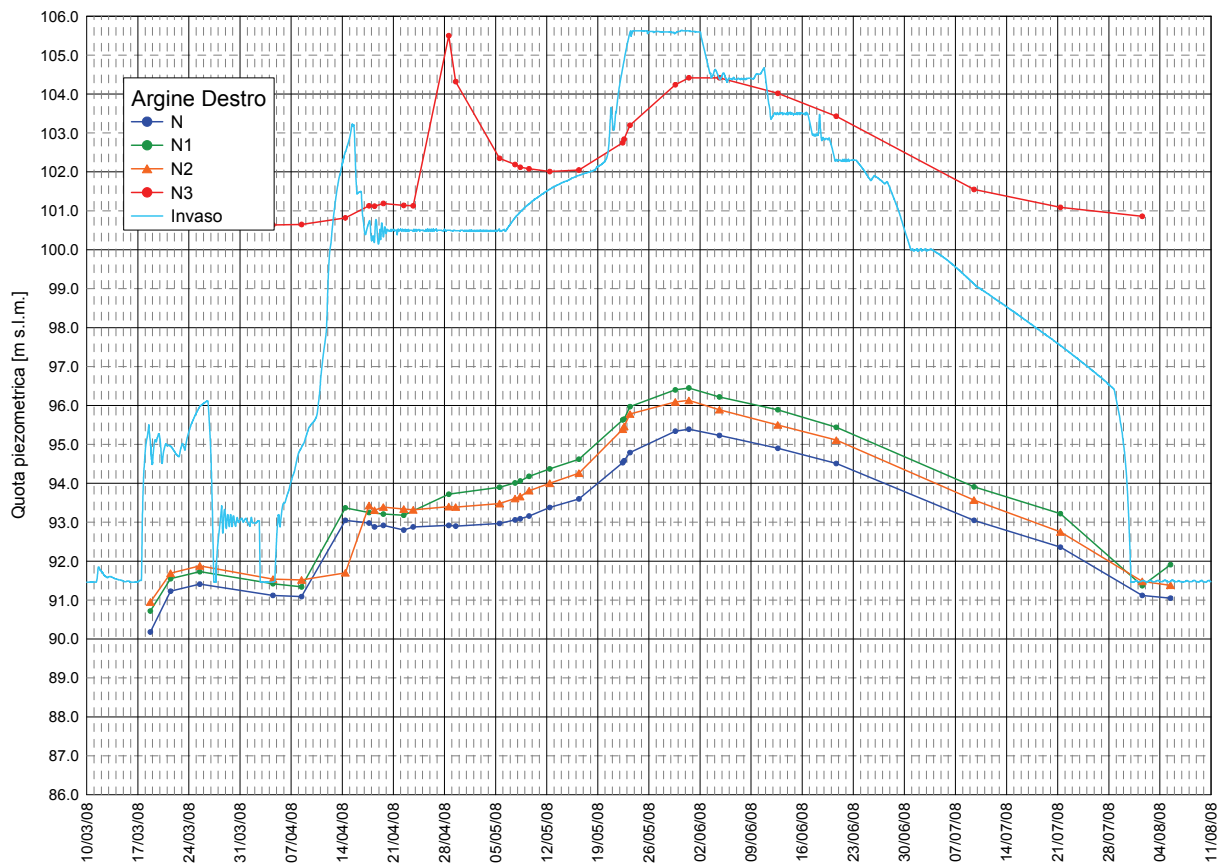


Figura 4-25- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri posti sull'argine destro lungo la sezione N.

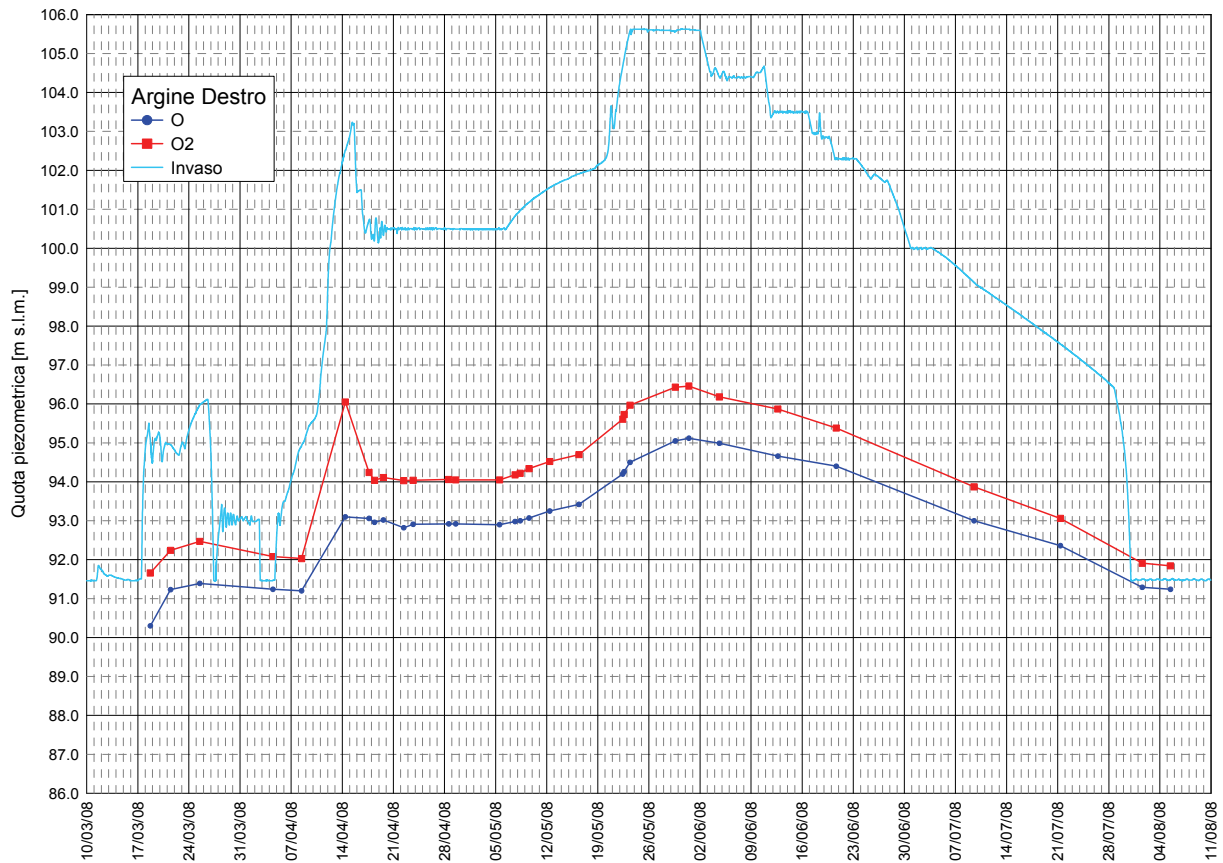


Figura 4-26- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri posti sull'argine destro lungo la sezione O.

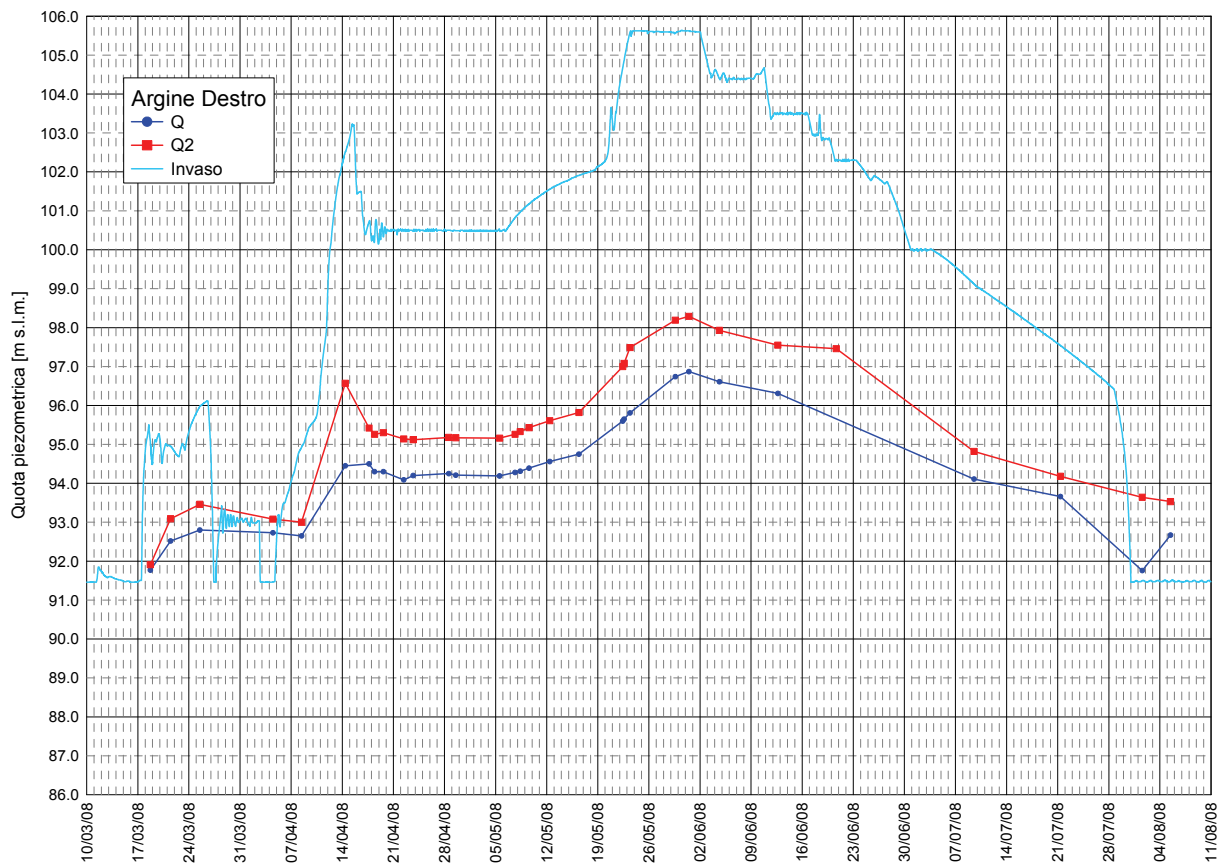


Figura 4-27- Andamento delle quote piezometriche ai piezometri posti sull'argine destro lungo la sezione Q.

Dalle figure 4-25:4-27, riportanti gli andamenti delle piezometri lungo le sezioni N, O e Q, possono trarsi le seguenti considerazioni:

5. il piezometro N3 ha misurato, in tutta la fase iniziale delle prove di invaso e fino alla metà di aprile, quote piezometriche ben superiori alle contemporanee quote di invaso (il picco registrato in data 28 aprile 2008 è dovuto ad uno slug-test effettuato per meglio comprenderne il comportamento, di cui si dirà poco più avanti);
6. tutti i piezometri di tipo “2” (N2, O2 e Q2) hanno fatto registrare quote piezometriche piuttosto basse, come ci si aspetterebbe da piezometri scavati a valle del diaframma di tenuta;
7. il piezometro N1 (sulla banca) ha registrato quote piezometriche in linea con quelle dei piezometri “2”, ben soggiacenti non solo alla quota della banca stesso ma anche a quella del piano campagna (i piezometri O1 e Q1 non sono mai stati realizzati);
8. analogo comportamento hanno manifestato, come già detto, i piezometri N, O e Q, posti al piede esterno dell’argine.

Dato che i comportamenti anomali dei piezometri L3, M3, N3, I2, L2 e M2 erano già emersi dopo le prime settimane delle prove di invaso, il giorno 28 aprile 2008 sono stati condotti slug-tests su alcuni di essi (L2, L3, M3 e N3), con l'obiettivo di individuarne l'affidabilità. Le prove sono state realizzate introducendo nei singoli piezometri un volume di acqua noto e misurando successivamente l'andamento temporale dello svuotamento con l'ausilio di un freatimetro e di un cronometro. I piezometri L2, L3 e M3, riempiti artificialmente, sono tornati alla quota iniziale (pari circa a quella dell’invaso) pressoché istantaneamente. Ciò è indice di elevata permeabilità del mezzo e conferma la presenza di un collegamento diretto con l’invaso. Si avanzano quindi fondati dubbi sulla posizione di tali piezometri rispetto al nucleo di argilla ed al diaframma. Cionondimeno, le quote piezometriche piuttosto depresse registrate dai piezometri al piede esterno dell’argine (L ed M) e sulla banca (L1 ed M1) confermerebbero la presenza di una cortina poco permeabile tra essi ed i piezometri 2 e 3, suggerendo uno schema di permeazione del tipo di quello mostrato nelle Figure 4-28:4-29 in cui i piezometri “2” sono posti a monte del diaframma di tenuta. Si ribadisce comunque che le quote piezometriche registrate dai piezometri sulla banca intermedia ed al piede d’argine sono tranquillizzanti ai fini del comportamento di tenuta dell’argine stesso. Il piezometro N3, riempito artificialmente, si innalza invece fino ad una quota pari a circa 105.60 m s.l.m.. Oltre tale quota un’ulteriore aggiunta di acqua, per quanto rapida, non provoca alcun innalzamento, segnalando l’esistenza di una via di fuga molto permeabile. Il livello nel piezometro si abbassa poi con estrema lentezza, richiedendo molti giorni per tornare ad una condizione prossima (ma non uguale) a quella iniziale. Si ritiene quindi che tale piezometro sia effettivamente scavato in corrispondenza del nucleo di argilla, la sommità del quale dovrebbe essere posta intorno a quota

105.60 m s.l.m. come ipotizzato in Figura 4-30. In ogni caso, non potendo garantire la totale impermeabilità del piezometro alle infiltrazioni di acqua piovana, le misure da esso derivate appaiono del tutto inattendibili.

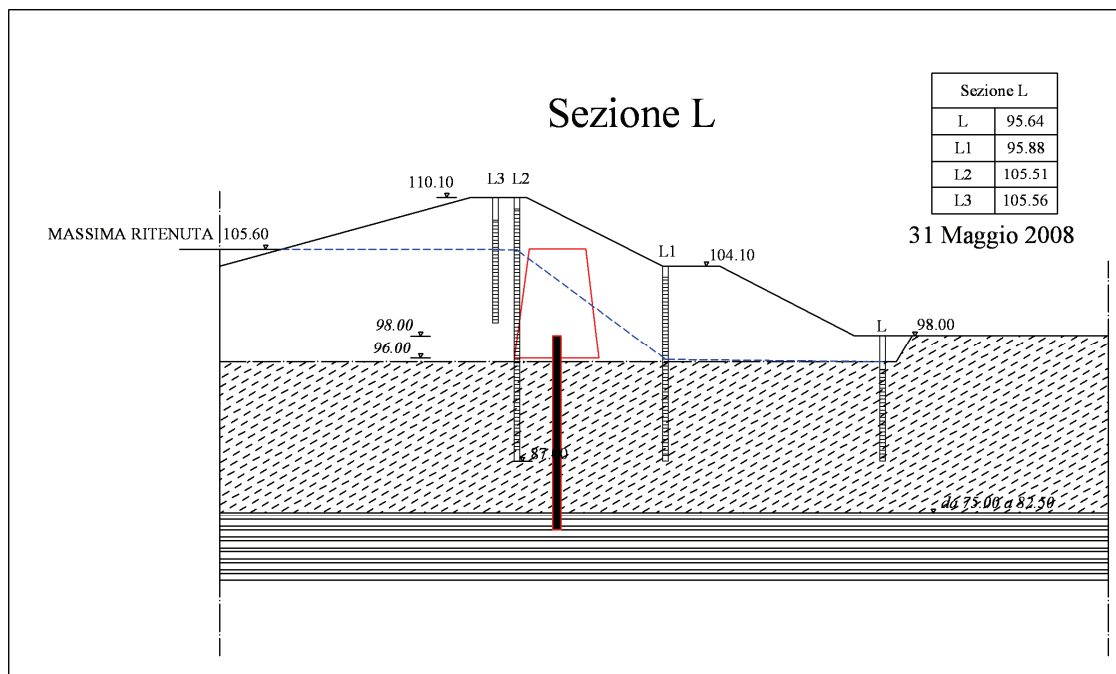


Figura 4-28- Possibile sezione trasversale in corrispondenza dei piezometri L (diaframma e nucleo sono spostati a valle del piezometro L2).

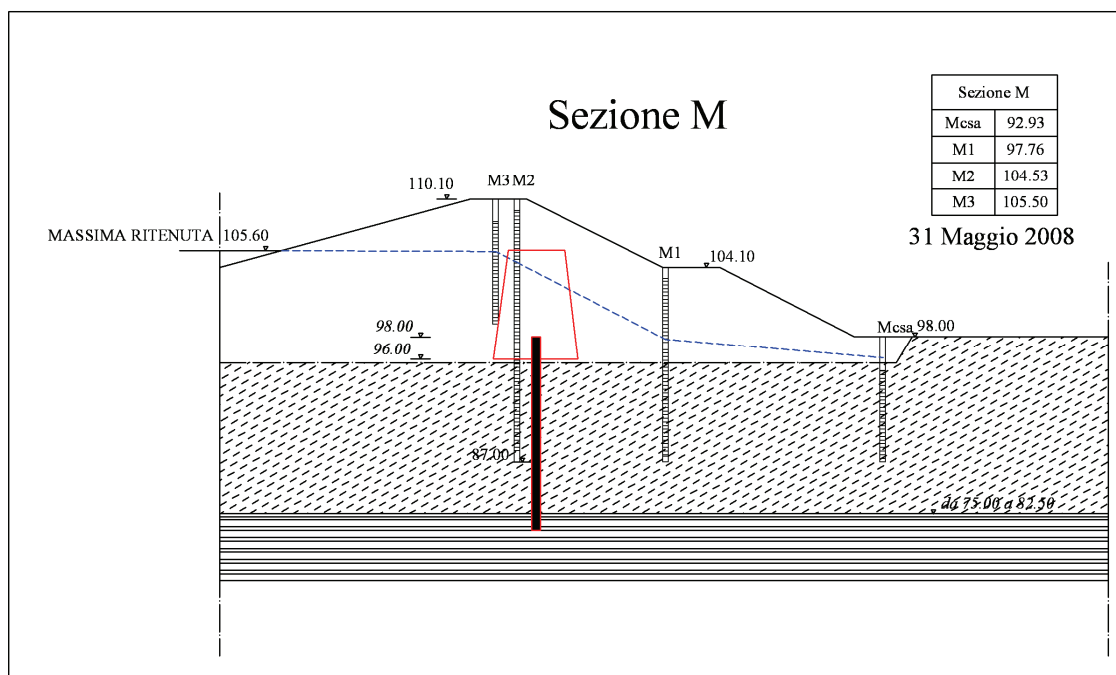


Figura 4-29- Possibile sezione trasversale in corrispondenza dei piezometri M (diaframma e nucleo sono spostati a valle del piezometro M2).

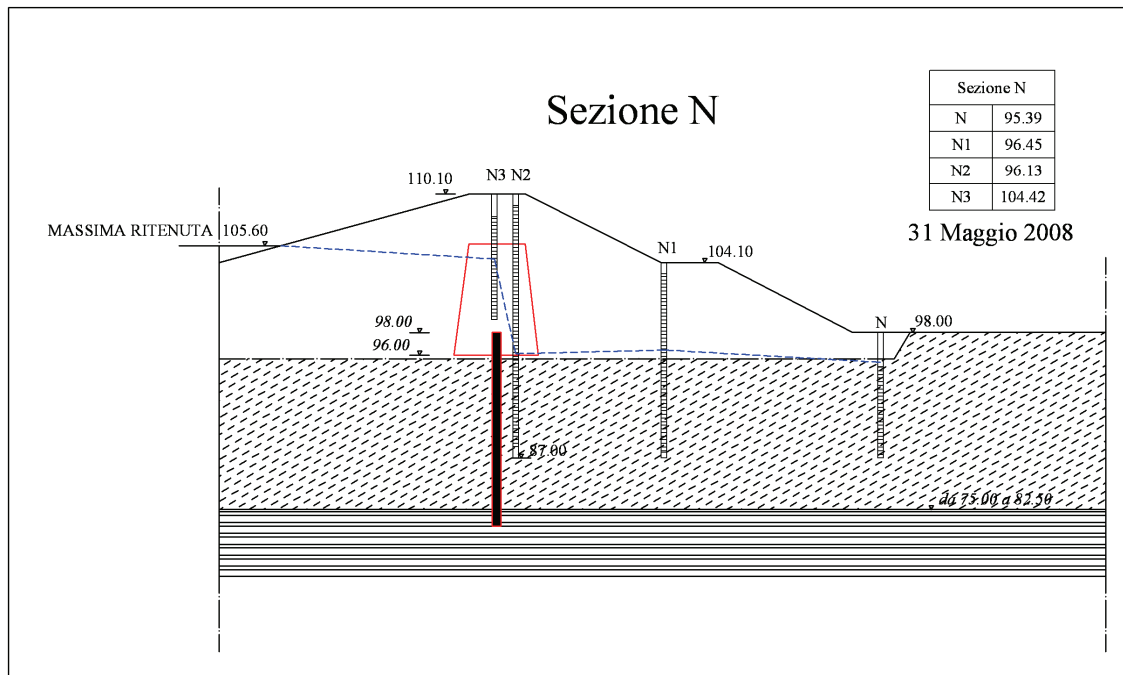


Figura 4-30- Possibile sezione trasversale in corrispondenza dei piezometri N (il piezometro N3 è scavato nel nucleo la cui sommità è posta circa a quota 105.60 m s.l.m.).

Nell' inverno 2008-2009 sono stati effettuati tre carotaggi nei pressi della sezione L con lo scopo di identificare la posizione del nucleo di argilla e del diaframma sottostante. Il primo sondaggio (S1), trivellato a partire dalla banca (Figura 4-31) con una inclinazione di 20° rispetto all'orizzontale, ha individuato la presenza del nucleo di argilla ad una distanza di 6.2 m per una estensione di 6.5 m. Il secondo sondaggio (S2), trivellato a partire dalla banca con un angolo di 51° rispetto all'orizzontale, ha rilevato il nucleo di argilla alla distanza di 7.5 m per una estensione di 1.2 m; alla distanza di 27.4 m è stato individuato il diaframma in calcestruzzo. Il terzo sondaggio è stato perforato a partire dalla sommità arginale con un'inclinazione di 4° rispetto alla verticale allo scopo di verificare i dati raccolti dai sondaggi precedenti e mostrare il contatto tra nucleo in argilla e diaframma. Questo sondaggio ha rilevato argilla a partire dalla profondità di 1.9 m per una estensione di soli 4.1 m; dalla profondità di 6 m fino a 30 m si è riscontrata la presenza di materiale ghiaioso, mentre il diaframma non è stato individuato.

Si ritiene che la mancata individuazione del diaframma possa essere spiegata se:

1. il sondaggio S2 non ha mantenuto la direzione prevista, per cui la distanza reale tra la banca e il diaframma risulta essere inferiore a quella osservata. Conseguentemente il sondaggio S3 è stato perforato a monte del diaframma stesso.

2. il sondaggio S3 ha effettivamente raggiunto il diaframma a valle ma, a causa della ridotta inclinazione, anziché perforarlo si è posto parallelamente al diaframma stesso.

La presenza di argilla solo nel tratto compreso tra circa 2 e 6 m di profondità, unitamente alle risultanze degli altri due sondaggi, non consentono di definire compiutamente la geometria del nucleo di argilla e del sottostante diaframma e suggeriscono di approfondire le indagini sul tratto in oggetto.

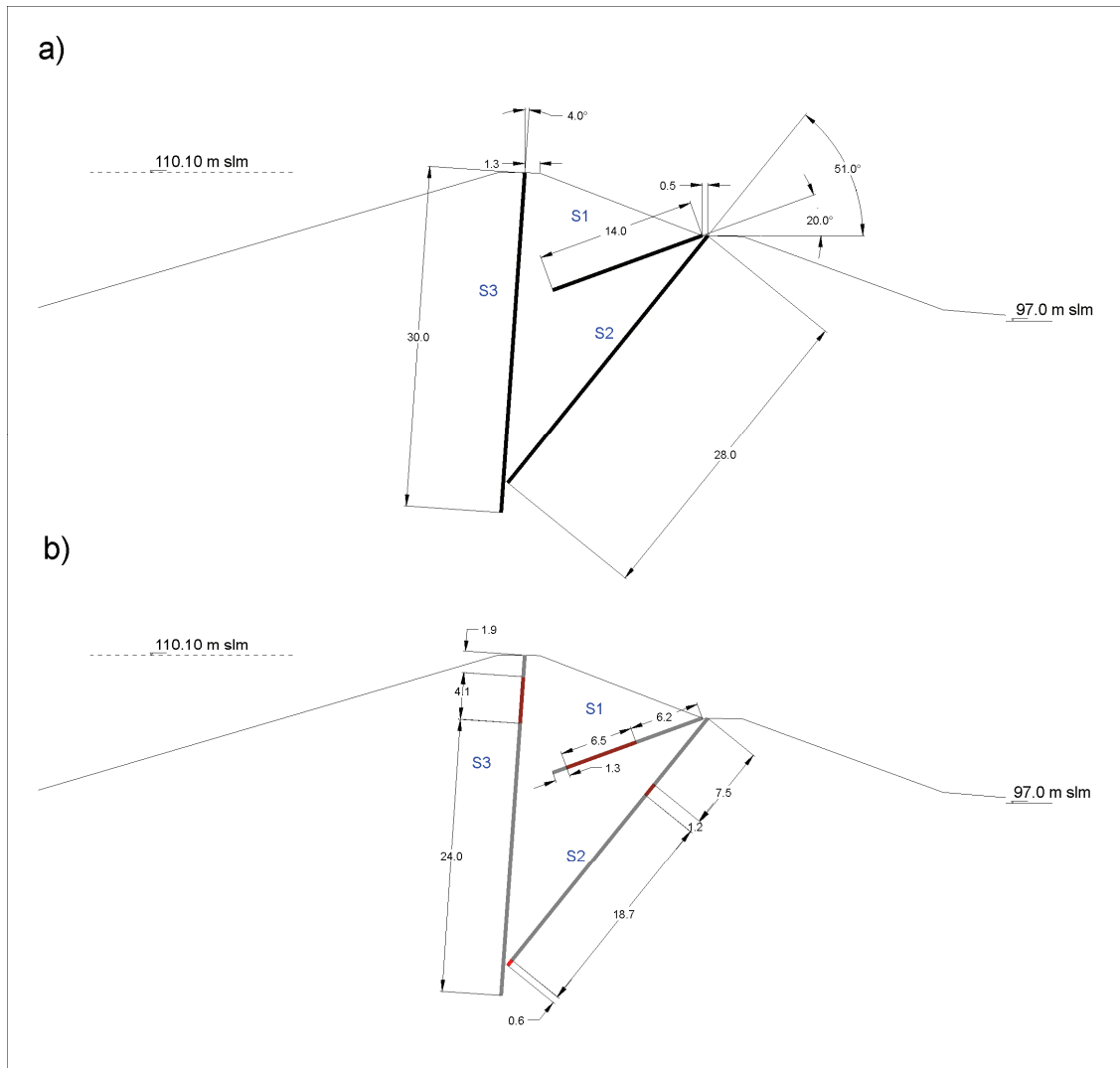


Figura 4-31 a) Posizione e profondità dei sondaggi nella sezione L; b) Descrizione dei sondaggi: in grigio ghiaie e sabbie, in marrone argilla e in rosso calcestruzzo; quote in metri

Per verificare le ragioni della cospicua venuta in sinistra idraulica in corrispondenza della strada carraia che porta al coronamento (Figura 4-32) sono state eseguite nel maggio 2009 delle tomografie elettriche, su commissione dell'AIPO.

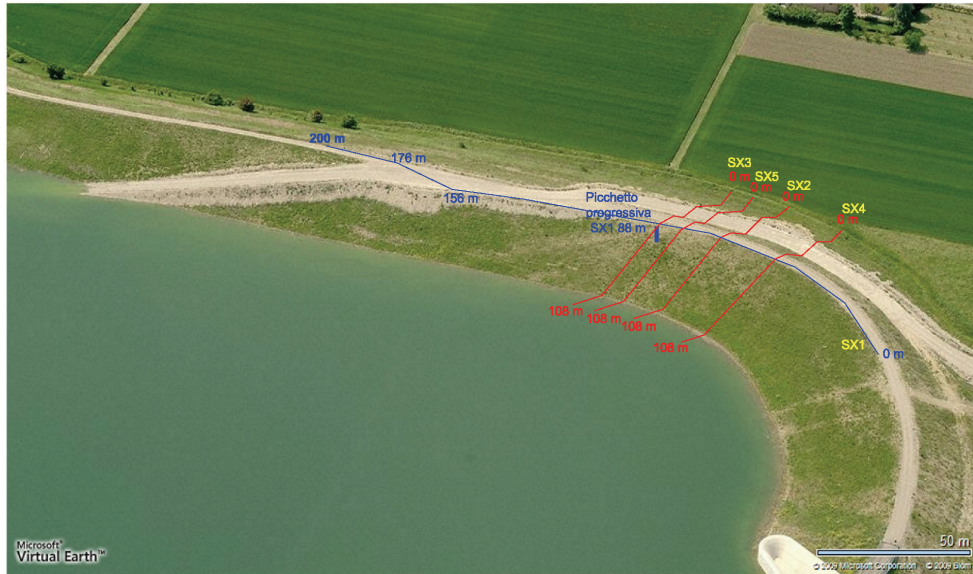


Figura 4-32 Ubicazione delle sezioni trasversali e longitudinale lungo le quali sono state realizzate le tomografie elettriche.

Anche se la sezione longitudinale sembra indicare la presenza di una zona ad elevata permeabilità, si ritiene comunque necessario effettuare ulteriori approfondimenti per comprendere la struttura dell'argine in questa zona e, se del caso, prendere gli opportuni provvedimenti volti ad eliminare definitivamente la perdita.

4.4. Quote piezometriche all'interno della cassa

Le Figure 4-33:4-35 riportano gli andamenti temporali delle quote piezometriche registrate ai piezometri posti in vicinanza del manufatto al piede interno delle arginature della cassa in sponda sinistra (S3) e sponda destra (S4, S5), assieme al corrispondente andamento delle quote di invaso. Per l'esatta ubicazione planimetrica e le caratteristiche dei piezometri si rimanda alla Figura 1-5 ed alle Tabelle 1-1 e 1-2. Si ricorda che le lettere A, B e C indicano rispettivamente i piezometri profondi, intermedi e superficiali. Il piezometro S3 presenta una lunga lacuna (quasi tre settimane) nella continuità della registrazione.

L'analisi comparata degli andamenti mette in evidenza alcuni comportamenti comuni ed alcune differenze.

I tre piezometri superficiali (lettera C), hanno seguito l'andamento delle quote di invaso senza apprezzabili perdite di carico, confermando la presenza di uno strato molto permeabile nei primi 8-10 metri, come risulta anche dai sondaggi geognostici effettuati durante la loro perforazione.

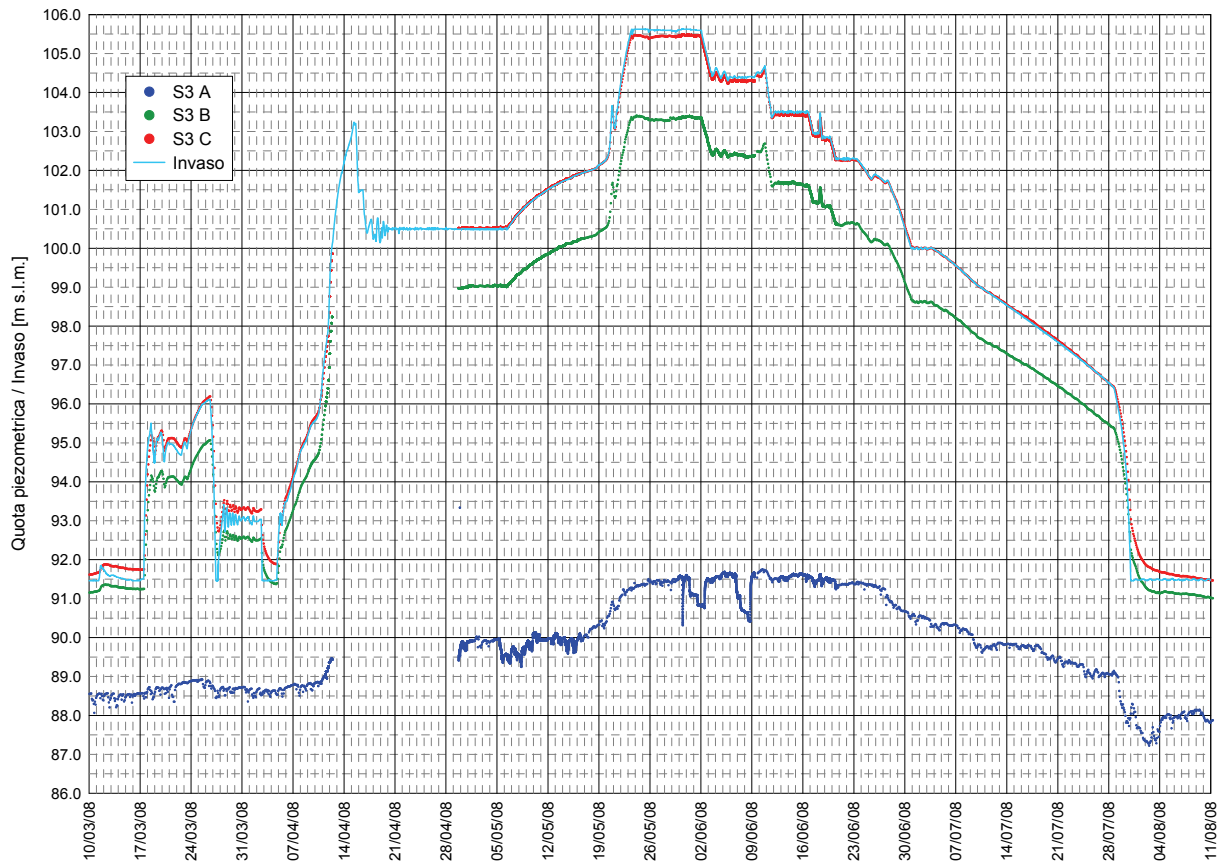


Figura 4-33- Andamento temporale delle quote di invaso e delle quote piezometriche ai piezometri S3.

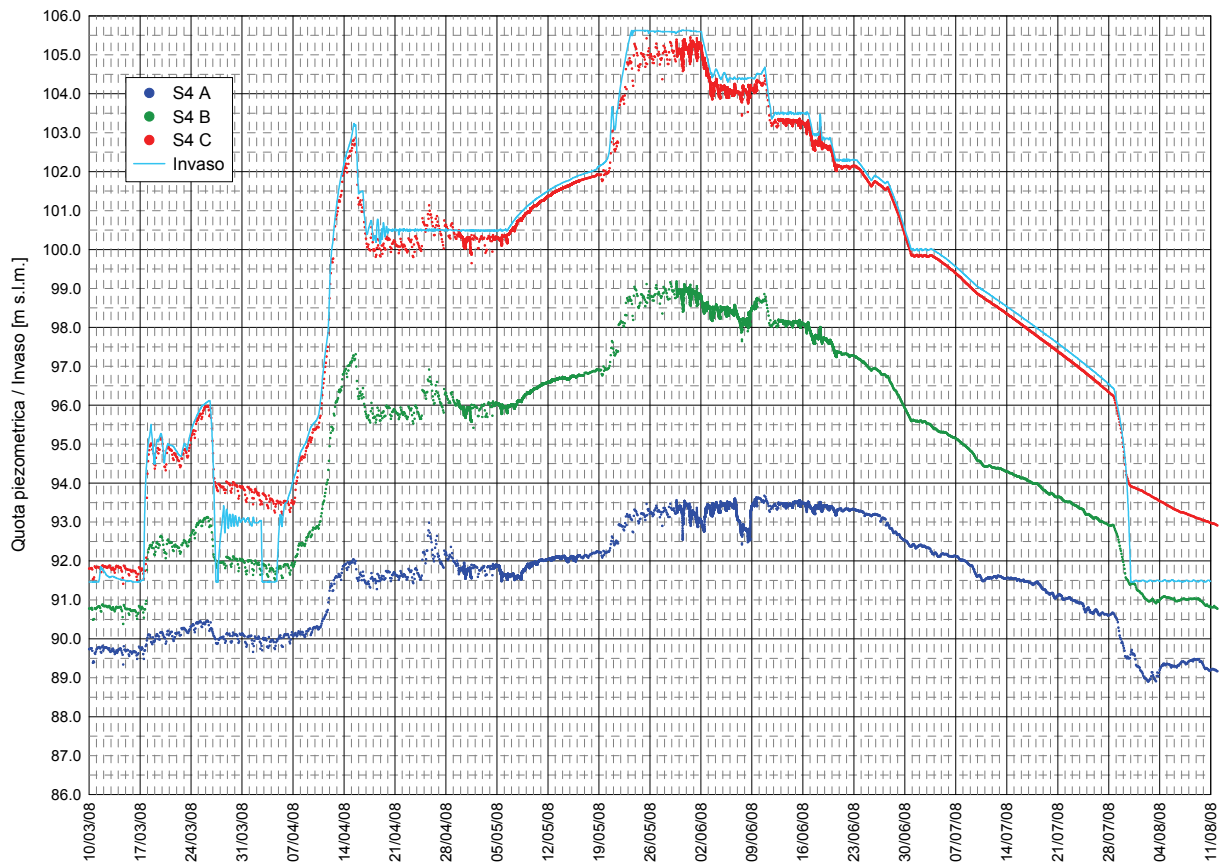


Figura 4-34- Andamento temporale delle quote di invaso e delle quote piezometriche ai piezometri S4.

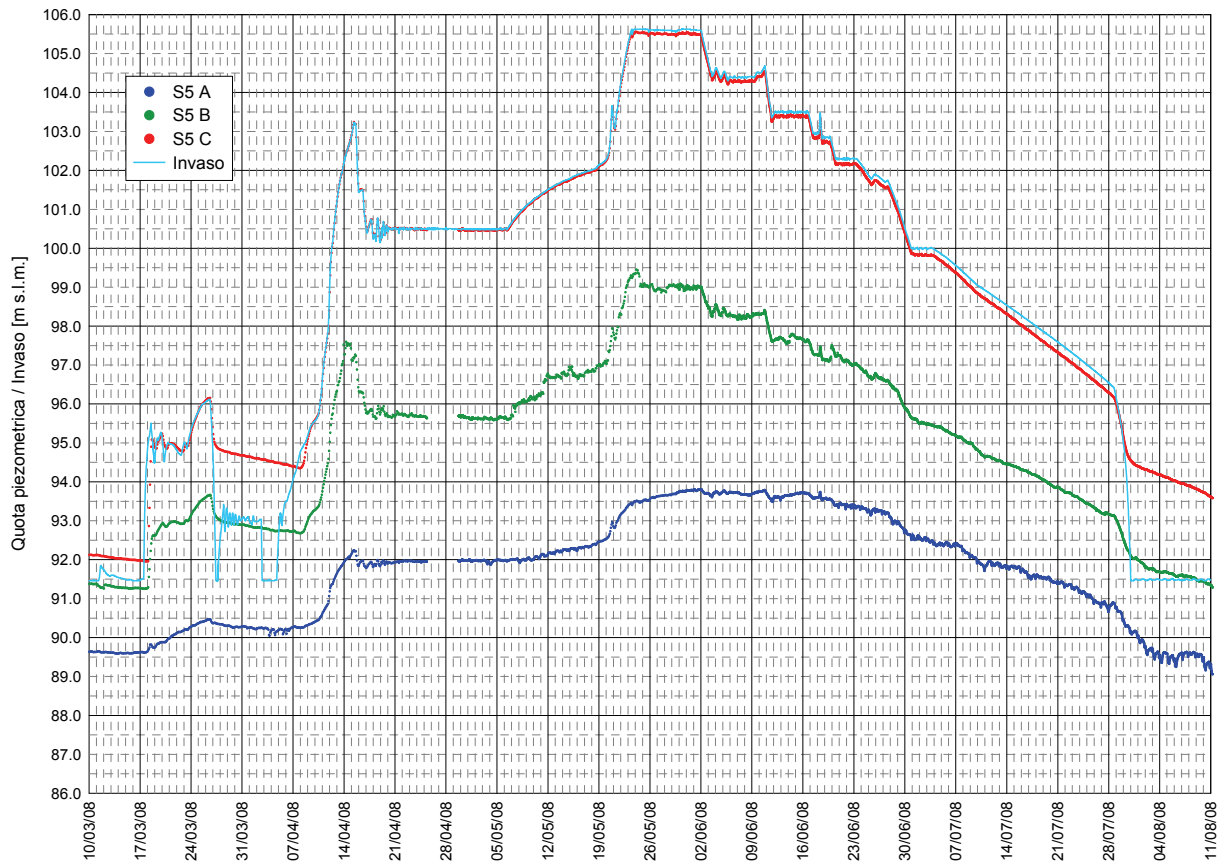


Figura 4-35- Andamento temporale delle quote di invaso e delle quote piezometriche ai piezometri S5.

I piezometri intermedi (lettera B) hanno presentato invece andamenti piuttosto differenti in destra e sinistra idraulica. Il piezometro S3B, posto in sinistra, fin dalle prime fasi degli invasi sperimentali ha fatto registrare quote piezometriche decisamente maggiori rispetto a quelle restituite dai piezometri S4B e S5B, posti in destra.

Anche i piezometri profondi mostrano differenze apprezzabili, ma in senso contrario: in corrispondenza del piezometro S3A le quote piezometriche non hanno mai superato 92 m s.l.m., mentre ai piezometri S4A e S5A si sono registrati valori di circa 2 metri superiori.

Ancor più evidenti sono le differenze di comportamento tra i piezometri S3 e S4-S5 se si confrontano i gradienti tra i piezometri superficiali e intermedi e tra quelli intermedi e profondi, riportati nella Figura 4-36 e nella Figura 4-37. In sinistra (S3) i gradienti tra il piezometro superficiale e quello intermedio (C-B) sono molto più limitati dei corrispondenti gradienti tra l'intermedio ed il profondo (B-A). Ciò conferma la presenza di uno strato a bassa permeabilità/elevato spessore tra le quote relative alle finestre di questi ultimi due piezometri (circa da -21 m a -32 m dalla quota del piano campagna) come confermato anche dai sondaggi geognostici. Invece i gradienti piezometrici in destra (S5) mostrano un comportamento opposto, e conducono a ritenere che non vi sia una netta separazione tra l'acquifero superficiale e quello profondo.

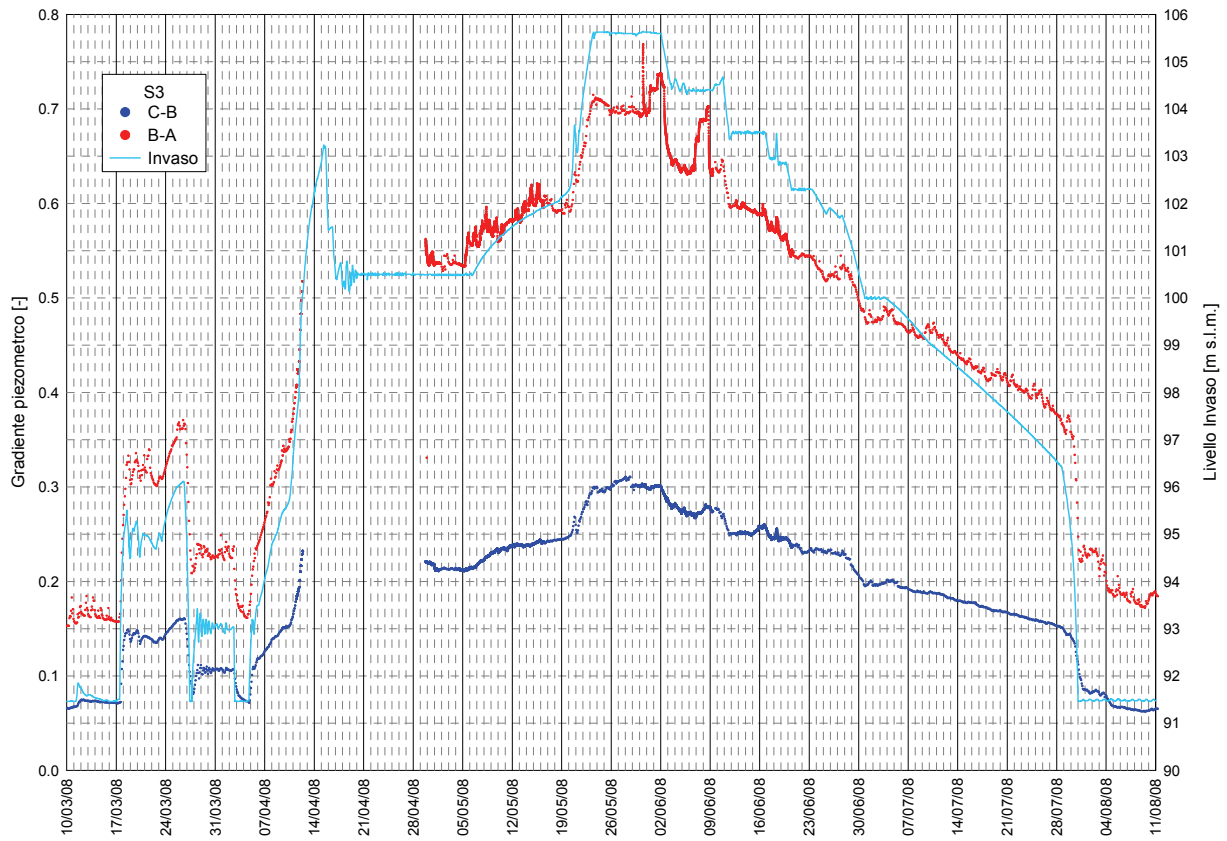


Figura 4-36 - Andamento temporale dei gradienti piezometrici tra i piezometri S3.

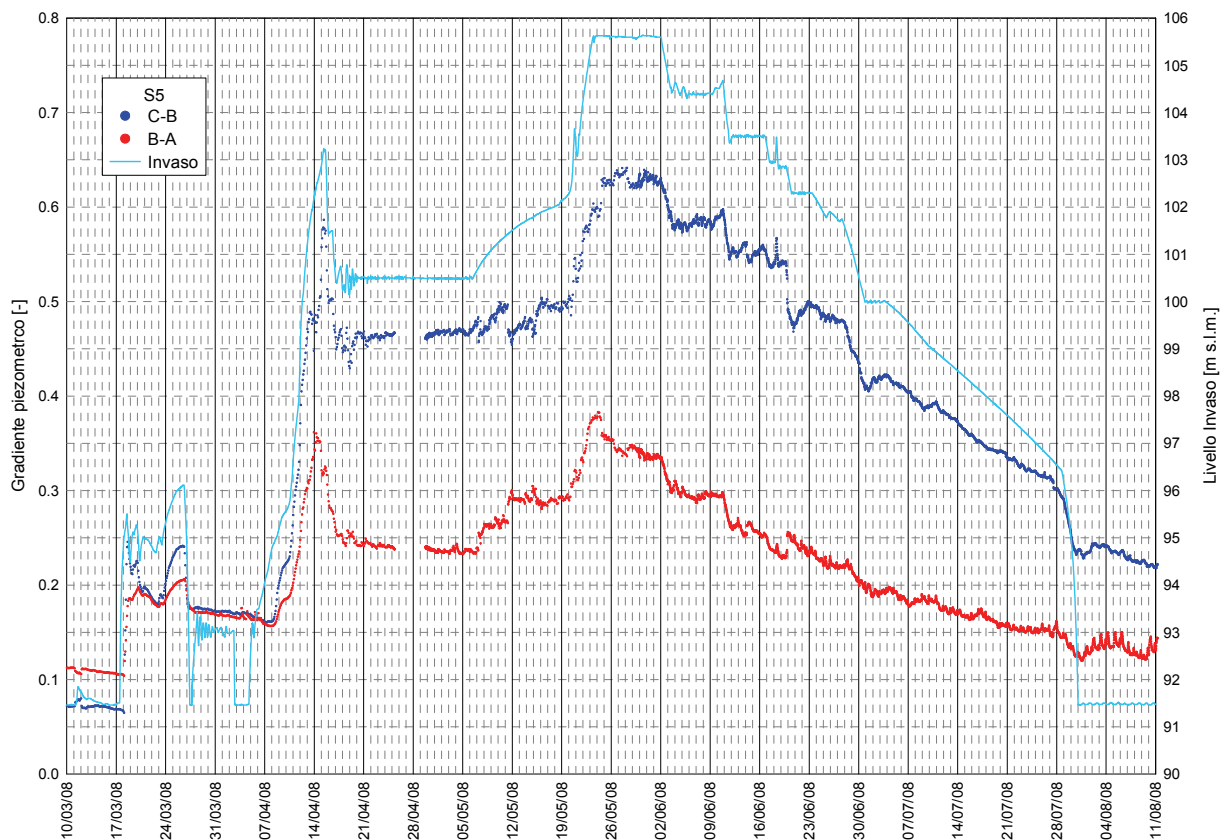


Figura 4-37 - Andamento temporale dei gradienti piezometrici tra i piezometri S5.

5. SCALE DELLE PORTATE DEL MANUFATTO REGOLATORE

Le portate uscenti dalle luci di fondo del manufatto regolatore e allontanate dallo sfioratore possono essere calcolate, una volta noti i livelli di invaso e il grado di apertura di ciascuna paratoia, mediante le seguenti leggi di efflusso:

- Portata allontanata da una luce in condizioni di funzionamento a pelo libero:

$$Q = \phi \cdot B \cdot h \sqrt{2g \cdot h} \quad (0 \leq h \leq 1.7 \div 2.0 \text{ a}) \quad (5.1)$$

dove $B = 7 \text{ m}$ è la larghezza della luce, h è il livello idrico misurato a monte della luce rispetto alla quota del piano di imbocco (91.00 m s.l.m.) e $\phi = 0.36$ il coefficiente di efflusso ricavato per taratura su modello fisico in laboratorio (cfr. Allegato B). La (5.1) è valida per livelli idrici h compresi tra 0 e $1.7 \div 2.0 \text{ a}$, dove a indica l'apertura della paratoia.

- Portata allontanata da una luce sotto battente:

$$Q = c_d \cdot a \cdot B \cdot \sqrt{2g(h - c_c \cdot a)} \quad (h > 1.7 \div 2.0 \text{ a}) \quad (5.2)$$

con:

$$c_d = \frac{c_c}{\left[1 - \left(c_c \cdot \frac{a}{h}\right)^2\right]^{0.5}} \quad (5.3)$$

dove c_c è il coefficiente di contrazione, ricavato per taratura su modello fisico in laboratorio (cfr. Allegato B), variabile con l'apertura secondo quanto riportato in Tabella 5-1.

Tabella 5-1 - Coefficiente di contrazione c_c per il funzionamento di una luce sotto battente.

$a \text{ (m)}$	$c_c \text{ (-)}$
$\rightarrow 0$	0.87
0.350	0.86
0.700	0.85
1.050	0.84
1.400	0.83
1.575	0.77
1.750	0.76
2.100	0.73
2.500	0.70

Portata allontanata dallo sfioratore di superficie:

$$Q = \mu \cdot c_L \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot (h - h_c)^{3/2} \quad (5.4)$$

con:

$$\mu = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[1 + \frac{4\chi}{9 + 5\chi} \right] \quad (5.5)$$

$$\chi = (h - h_c) / h_d$$

dove $c_L = 0.96$ è un coefficiente correttivo della lunghezza dello sfioro che tiene conto degli effetti prodotti dalla curvatura del ciglio in corrispondenza dei becchi d'anatra (ricavato per taratura su modello fisico in laboratorio), $(h - h_c)$ è il tirante idrico misurato rispetto al ciglio sfiorante e $h_d = 1.90$ m rappresenta il valore di progetto della stessa grandezza.

Nel caso di funzionamento contemporaneo di più luci a pelo libero o sotto battente, occorre calcolare con le (5.1) o le (5.2) la portata allontanata da ciascuna luce e poi sommare le portate. Allo stesso modo, nel caso di funzionamento contemporaneo di una (o più) luci e sfioratore di superficie le portate vanno calcolate separatamente e poi sommate.

In Figura 5-1, Tabella 5-2 e nell'Allegato C sono riportati, per alcuni gradi di apertura, gli andamenti grafici ed i valori numerici della scala delle portate uscenti dal manufatto considerando tutte le paratoie aperte al medesimo grado.

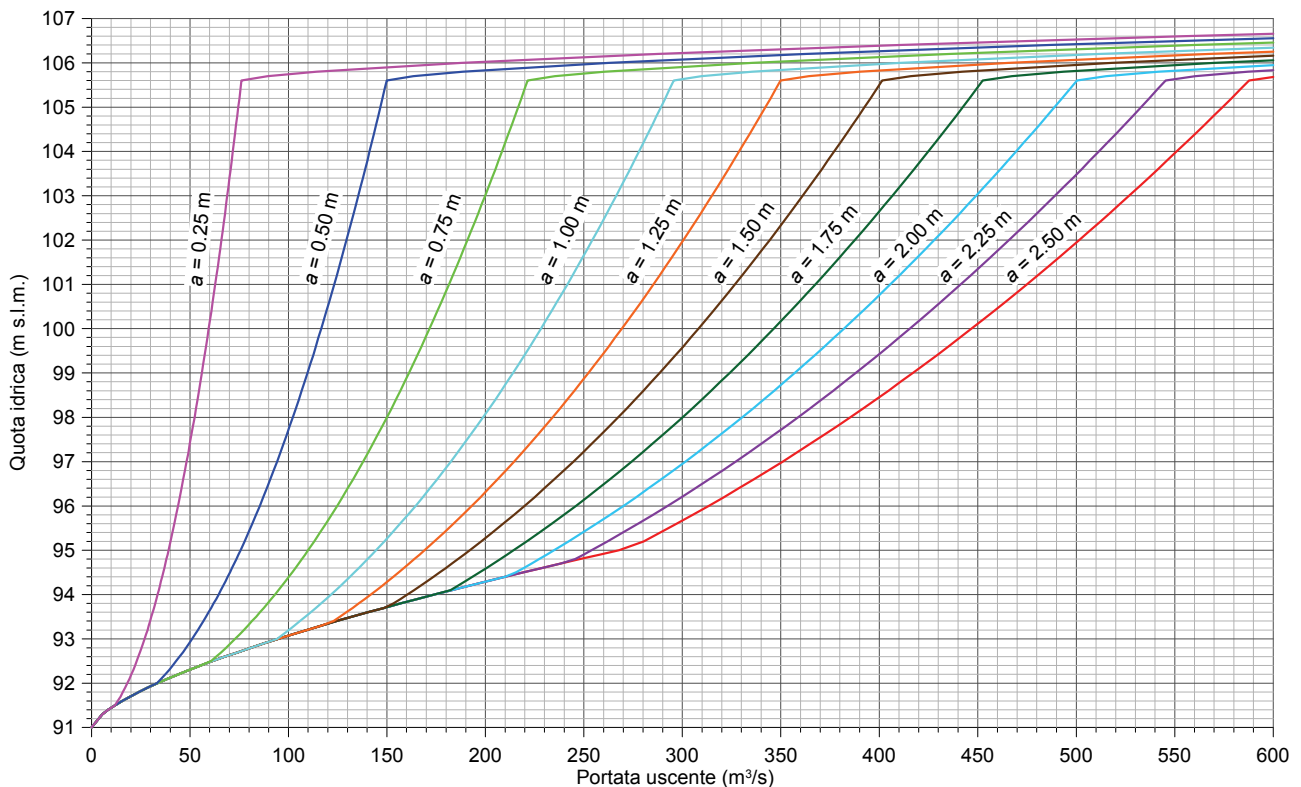


Figura 5-1 - Grafici delle scale delle portate per alcuni gradi di apertura delle paratoie (tre paratoie aperte).

Tabella 5-2 - Valori delle scale delle portate per alcuni gradi di apertura delle paratoie (tre paratoie aperte).

Quota m slm	Liv. m	Portata uscente (m³/s) con apertura a (m)										Quota m slm	Liv. m	Portata uscente (m³/s) con apertura a (m)									
		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50			0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
91.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98.4	7.4	53.8	105	155	205	242	276	310	341	371	398
91.3	0.3	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	98.6	7.6	54.5	107	157	208	245	280	315	347	377	405
91.4	0.4	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	98.8	7.8	55.3	108	159	211	249	284	319	352	382	411
91.5	0.5	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	99.0	8.0	56.0	110	161	214	252	288	324	357	388	417
91.6	0.6	13.3	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	99.2	8.2	56.7	111	163	217	256	292	329	362	394	423
91.7	0.7	14.7	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	99.4	8.4	57.4	113	165	220	259	296	333	367	399	429
91.8	0.8	15.9	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	99.6	8.6	58.1	114	168	223	263	300	338	372	405	435
91.9	0.9	17.1	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	99.8	8.8	58.8	115	170	225	266	304	342	377	410	441
92.0	1.0	18.2	33.3	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	100.0	9.0	59.5	117	172	228	269	308	346	382	415	447
92.1	1.1	19.2	35.4	38.6	38.6	38.6	38.6	38.6	38.6	38.6	38.6	100.2	9.2	60.2	118	174	231	273	312	351	387	421	453
92.2	1.2	20.2	37.4	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	100.4	9.4	60.8	119	176	234	276	316	355	392	426	458
92.3	1.3	21.2	39.4	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6	100.6	9.6	61.5	121	178	236	279	319	359	396	431	464
92.4	1.4	22.1	41.2	55.5	55.5	55.5	55.5	55.5	55.5	55.5	55.5	100.8	9.8	62.1	122	180	239	282	323	363	401	436	469
92.5	1.5	23.0	43.0	60.8	61.5	61.5	61.5	61.5	61.5	61.5	61.5	101.0	10.0	62.8	123	182	242	285	327	368	406	441	475
92.6	1.6	23.8	44.7	63.3	67.8	67.8	67.8	67.8	67.8	67.8	67.8	101.2	10.2	63.4	125	183	244	288	330	372	410	446	480
92.7	1.7	24.6	46.4	65.8	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	101.4	10.4	64.0	126	185	247	291	334	376	415	451	486
92.8	1.8	25.4	48.0	68.3	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9	101.6	10.6	64.7	127	187	249	295	337	380	419	456	491
92.9	1.9	26.2	49.6	70.6	87.7	87.7	87.7	87.7	87.7	87.7	87.7	101.8	10.8	65.3	128	189	252	298	341	384	424	461	496
93.0	2.0	27.0	51.1	72.9	94.2	94.7	94.7	94.7	94.7	94.7	94.7	102.0	11.0	65.9	130	191	254	301	344	388	428	466	501
93.1	2.1	27.7	52.6	75.2	97.2	102	102	102	102	102	102	102.2	11.2	66.5	131	193	257	303	348	391	432	471	507
93.2	2.2	28.4	54.0	77.3	100	109	109	109	109	109	109	102.4	11.4	67.1	132	195	259	306	351	395	437	475	512
93.3	2.3	29.1	55.4	79.5	103	117	117	117	117	117	117	102.6	11.6	67.7	133	196	262	309	354	399	441	480	517
93.4	2.4	29.8	56.8	81.5	106	123	125	125	125	125	125	102.8	11.8	68.3	134	198	264	312	358	403	445	485	522
93.5	2.5	30.4	58.1	83.6	109	126	132	132	132	132	132	103.0	12.0	68.9	135	200	266	315	361	407	449	489	527
93.6	2.6	31.1	59.5	85.6	111	129	140	140	140	140	140	103.2	12.2	69.5	137	202	269	318	364	410	453	494	532
93.7	2.7	31.7	60.8	87.5	114	133	149	149	149	149	149	103.4	12.4	70.1	138	203	271	321	368	414	457	498	537
93.8	2.8	32.4	62.0	89.4	117	136	153	157	157	157	157	103.6	12.6	70.6	139	205	273	323	371	418	461	503	541
93.9	2.9	33.0	63.3	91.3	119	139	157	165	165	165	165	103.8	12.8	71.2	140	207	276	326	374	421	465	507	546
94.0	3.0	33.6	64.5	93.1	122	142	160	174	174	174	174	104.0	13.0	71.8	141	208	278	329	377	425	469	511	551
94.1	3.1	34.2	65.7	94.9	124	145	164	182	183	183	183	104.2	13.2	72.3	142	210	280	332	380	428	473	516	556
94.2	3.2	34.7	66.9	96.7	126	148	167	186	192	192	192	104.4	13.4	72.9	143	212	282	334	383	432	477	520	560
94.3	3.3	35.3	68.0	98.5	129	150	170	190	201	201	201	104.6	13.6	73.4	145	213	285	337	386	435	481	524	565
94.4	3.4	35.9	69.2	100	131	153	174	193	210	210	210	104.8	13.8	74.0	146	215	287	340	389	439	485	529	570
94.5	3.5	36.4	70.3	102	133	156	177	197	216	219	219	105.0	14.0	74.5	147	217	289	342	393	442	489	533	574
94.6	3.6	37.0	71.4	104	136	159	180	201	220	229	229	105.2	14.2	75.0	148	218	291	345	396	446	493	537	579
94.7	3.7	37.5	72.5	105	138	161	183	204	223	238	238	105.4	14.4	75.6	149	220	293	347	399	449	497	541	583
94.8	3.8	38.0	73.6	107	140	164	186	208	227	246	248	105.6	14.6	76.1	150	221	296	350	401	453	500	545	588
94.9	3.9	38.6	74.6	108	142	167	189	211	231	250	258	105.7	14.7	76.7	151	223	298	352	403	455	502	547	590
95.0	4.0	39.1	75.7	110	144	169	192	214	235	254	268	105.8	14.8	77.2	152	225	300	354	405	457	504	549	592
95.2	4.2	40.1	77.7	113	149	174	198	221	242	262	280	106.0	15.0	77.8	153	227	302	356	407	459	506	551	594
95.4	4.4	41.1	79.7	116	153	179	204	227	249	270	289	106.2	15.2	78.3	154	229	304	358	409	461	508	553	596
95.6	4.6	42.1	81.6	119	157	184	209	234	256	278	297	106.4	15.4	78.8	155	231	306	360	411	463	509	555	598
95.8	4.8	43.0	83.6	122	161	188	214	240	263	285	305	106.6	15.6	79.3	156	233	308	362	413	465	511	557	600
96.0	5.0	43.9	85.4	125	164	193	220	246	270	292	313	106.8	15.8	79.7	157	235	310	364	415	467	513	559	602
96.2	5.2	44.8	87.2	127	168	197	225	252	277	300	321	107.0	16.0	80.2	158	237	312	366	417	469	515	561	604
96.4	5.4	45.7	89.0	130	172	202	230	258	283	307	329	107.2	16.2	80.6	159	239	314	368	419	471	517	563	606
96.6	5.6	46.6	90.8	133	175	206	235	263	289	314	336	107.4	16.4	81.0	160	241	316	370	421	473	519	565	608
96.8	5.8	47.4	92.5	135	179	210	240	269	295	320	344	107.6	16.6	81.4	161	243	318	372	423	475	521	567	610
97.0	6.0	48.3	94.2	138	182	215	245	274	301	327	351	107.8	16.8	81.8	162	245	320	374	425	477	523	569	612
97.2	6.2	49.1	95.8	140	186	219	249	280	307	334	358	108.0	17.0	82.2	163	247	322	376	427	479	525	571	614
97.4	6.4	49.9	97.5	143	189	223	254	285	313	340	365	108.2	17.2	82.6	164	249	324	378	429	481	527	573	616
97.6	6.6	50.7	99.1	145	192	226	259	290	319	346	372	108.4	17.4	83.0	165	251	326	380	431	483	529	575	618
97.8	6.8	51.5	101	148	196	230	263	295	325	353	379	108.6	17.6	83.4	166	253	328	382	433	485	531	577	620
98.0	7.0	52.3	102	150	199	234	267	300	330	359	385	108.8	17.8	83.8	167	255	330	384	435	487	533	579	622
98.2	7.2	53.1	104	152	202	238	272	305	336	365	392	109.0	18.0	84.2	168	257	332	386	437	489	535	581	624

6. DETERMINAZIONE DEI TEMPI DI SVUOTAMENTO DELLA CASSA

La determinazione dei tempi di svuotamento della cassa può risultare utile in numerose circostanze, quali, ad esempio:

1. durante le prove di invaso, per prevedere l'evoluzione temporale futura dei livelli nella cassa;
2. nel caso in cui si decida di mantenere parzialmente invasata la cassa e rilasciare gradualmente il volume in essa contenuto, allo scopo di ridurre i periodi di totale assenza d'acqua nell'alveo del torrente Parma a valle;
3. nel caso di previsioni meteorologiche avverse e cassa, per qualunque motivo, non completamente svasata.

Il tempo di svuotamento è funzione del volume idrico presente nella cassa, del grado di apertura delle luci di fondo e della portata in ingresso. In generale la portata in ingresso è variabile nel tempo e, qualora si effettuino manovre sulle paratoie, anche l'apertura delle luci può essere variabile nel tempo. Non è quindi possibile analizzare tutti i casi possibili e ricondurli in forma di abachi immediatamente utilizzabili. Nel presente studio si sono considerati i seguenti casi:

1. una sola paratoia aperta, con differenti gradi di apertura; ciascun grado di apertura viene però mantenuto costante nel tempo;
2. due paratoie aperte, con stesso grado di apertura; anche in questo caso si sono considerati diversi gradi di apertura, invariabili però nel tempo;
3. idem, ma con tre paratoie aperte;
4. portata in ingresso costante durante lo svuotamento della cassa, con valori di 0, 5, 10 o 20 m³/s.

In tutti i casi esaminati si è considerato che la cassa fosse invasata fino alla quota di sfioro. Ciò non è una limitazione in quanto le situazioni in cui la quota di invaso è inferiore sono implicitamente considerate.

Il problema in esame è descrivibile attraverso il seguente sistema di equazioni differenziali.

• Equazione di continuità:

$$Q_e - Q_u(t) = \frac{dW(t)}{dt} \quad (6.1)$$

nella quale Q_e e $Q_u(t)$ rappresentano, rispettivamente, la portata entrante (costante) e la portata uscente all'istante t e $W(t)$ è il volume immagazzinato nel medesimo istante nella cassa;

• Equazione di efflusso dagli organi di scarico:

$$Q_u = f(h) \quad (6.2)$$

nella quale la portata uscente Q_u dipende dal livello idrico h nell'invaso, secondo le espressioni riportate al precedente Capitolo 5;

- Equazione che descrive la geometria dell'invaso:

$$W = g(h) \tag{6.3}$$

ricavata numericamente partendo dal rilievo laser-scanner effettuato per conto dell'AIPO e riportata nell'Allegato D.

Il sistema composto dalle (6.1), (6.2) e (6.3) definisce completamente il problema, una volta noto l'andamento della portata in ingresso Q_e (supposto, come già detto, costante) e le condizioni iniziali dell'invaso.

Nell'Allegato D sono riportati i grafici contenenti le curve di svaso, in base al numero delle paratoie mobilitate ed al valore della portata in ingresso.

Allo scopo di mostrare l'utilizzo dei grafici così ottenuti, si consideri il seguente esempio. Si voglia valutare il tempo che impiega l'invaso a svuotarsi da quota 100 m s.l.m. a quota 95 s.l.m. con una sola paratoia aperta con apertura $a=20$ cm, supponendo che la portata in ingresso possa essere considerata costante e pari a $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Nella Figura 6-1 è riportato il grafico relativo ad una sola paratoia aperta e portata in ingresso costante pari a $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (estratto dai grafici riportati nell'Allegato D). Individuata la curva relativa al grado di apertura desiderato (20 cm) ed i punti caratterizzanti lo stato iniziale (100 m s.l.m.) e finale (95 m s.l.m.), si evince immediatamente che il tempo necessario è di circa 4.7 giorni. E' appena il caso di sottolineare che, con un'apertura di 15 cm anziché di 20, il tempo necessario si allunga da 4.7 a circa 8 giorni. La conoscenza dell'esatto grado di apertura è quindi determinante sul risultato. L'attuale sistema di acquisizione del grado di apertura delle paratoie non garantisce invece una precisione adeguata, tant'è che a volte a paratoie completamente chiuse restituisce valori anche di 6-7 centimetri. Si consiglia pertanto di prevedere un miglioramento del sistema.

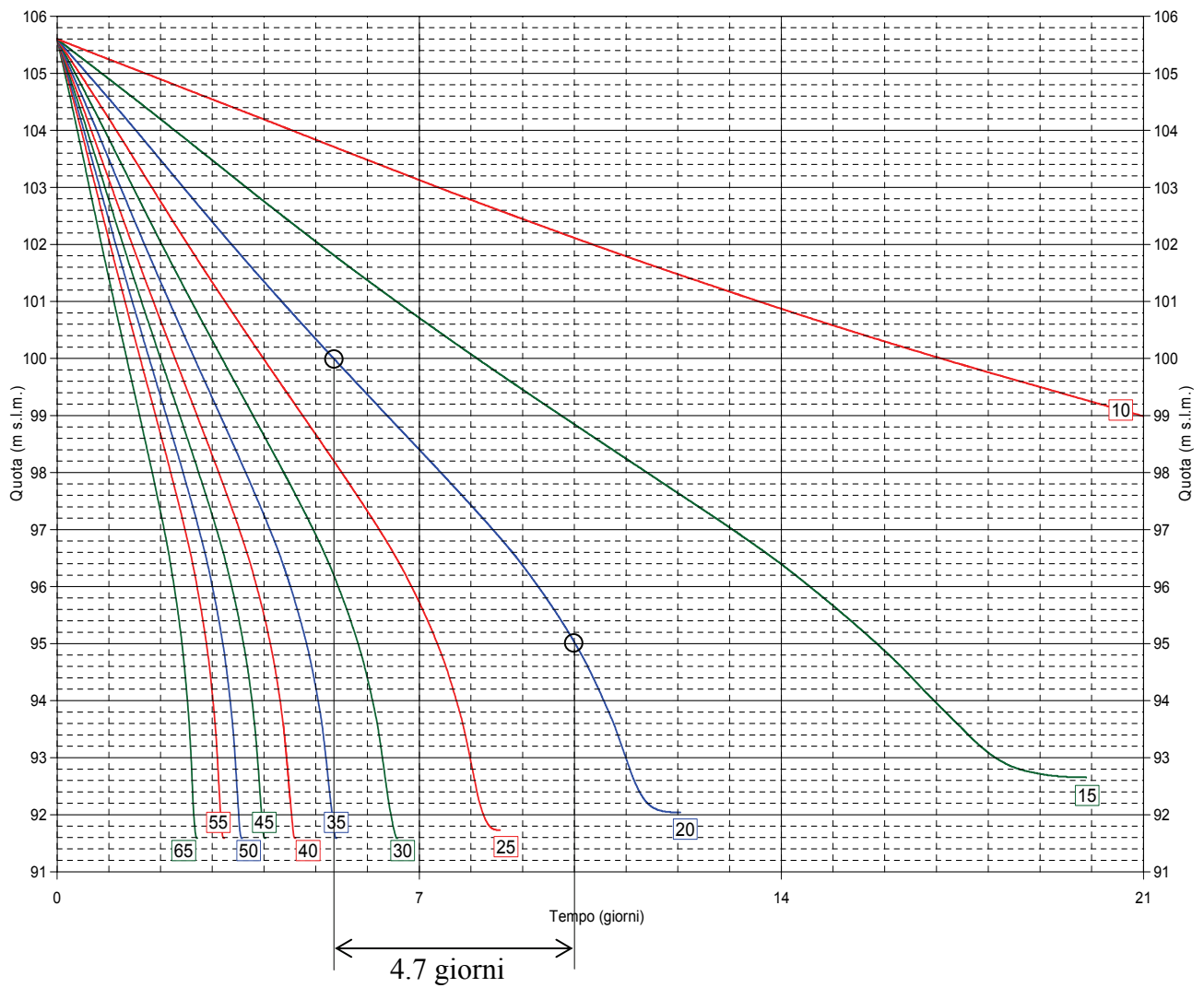


Figura 6-1 – Esempio di calcolo del tempo di svuotamento (1 paratoia aperta, $Q_e = 5 \text{ m}^3/\text{s}$)

7. INDIVIDUAZIONE DELLE PORTATE ENTRANTI NELLA CASSA

Le misure contemporanee dei livelli idrici nella cassa e del grado di apertura delle paratoie consentono di ricavare la portata uscente dalle luci di fondo del manufatto regolatore e, attraverso la risoluzione inversa dell'equazione di continuità, anche le portate in ingresso alla cassa. Ciò può essere utile per valutarne l'effetto di laminazione e per effettuare studi sul regime delle portate in ingresso (curve di durata delle portate, ecc.).

Come già accennato al Capitolo 1, il misuratore ad immersione non è però in grado di misurare al di sotto di quota 91.50 m s.l.m.; a questo livello ed in condizioni di efflusso a pelo libero corrisponde una portata uscente dal manufatto regolatore di circa $12 \text{ m}^3/\text{s}$ con le tre paratoie aperte. Analizzando le misure effettuate alla stazione di Ponte Bottego nel periodo 1956-77 (integrate dalle misure effettuate a Ponte Verdi nel periodo 2003-06) e sottraendo il contributo del torrente Baganza, si evince che a tale portata corrisponde, nella sezione dello sbarramento, una durata di circa 45 giorni. Ciò significa che mediamente solo per 45 giorni all'anno la portata in ingresso alla cassa supera i $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Questa constatazione rende ancora più evidente la necessità di disporre di un sistema di misura che consenta di calcolare la portata anche per valori più bassi di $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Nella situazione attuale il regime delle portate in ingresso può quindi essere calcolato solo per alcuni periodi.

In particolare, a partire dall'inizio della quinta fase delle prove di invaso (aprile 2008) e fino alla fine del mese di luglio 2009 la quota nella cassa risulta aver superato i 91.50 m s.l.m. nei seguenti periodi:

1. Aprile-luglio 2008 (figura 7-1). In questo periodo la cassa è stata invasata per effettuare la quinta fase delle prove di invaso. Le paratoie sono state movimentate quasi in continuazione, sia in automatico che manualmente, allo scopo di controllare le fasi di riempimento e di svuotamento.
2. 30 novembre-25 dicembre 2008 (Figura 7-2). In questo periodo la cassa si è invasata naturalmente a causa delle intense precipitazioni che hanno investito il bacino del torrente Parma. Non sono state effettuate movimentazioni delle paratoie che sono rimaste, per tutto il periodo, con apertura $a=1.70 \text{ m}$, pari a quella di regolazione normale.
3. 19 gennaio – 16 febbraio 2009 (Figura 7-3). Anche in questo caso la cassa ha cominciato ad invasarsi naturalmente a causa delle intense precipitazioni cadute sul bacino del torrente Parma. Visto che l'evento presentava caratteri di una certa rilevanza, ma non tali da far ritenere che la cassa si sarebbe invasata completamente, a partire dalle ore 15 del 20 gennaio e fino al 23 gennaio sono state effettuate da parte dell'AIPO alcune manovre (Figura 7-4)

tese a migliorare l'effetto di laminazione e ridurre così ulteriormente le portate scaricate nell'alveo del Parma a valle.

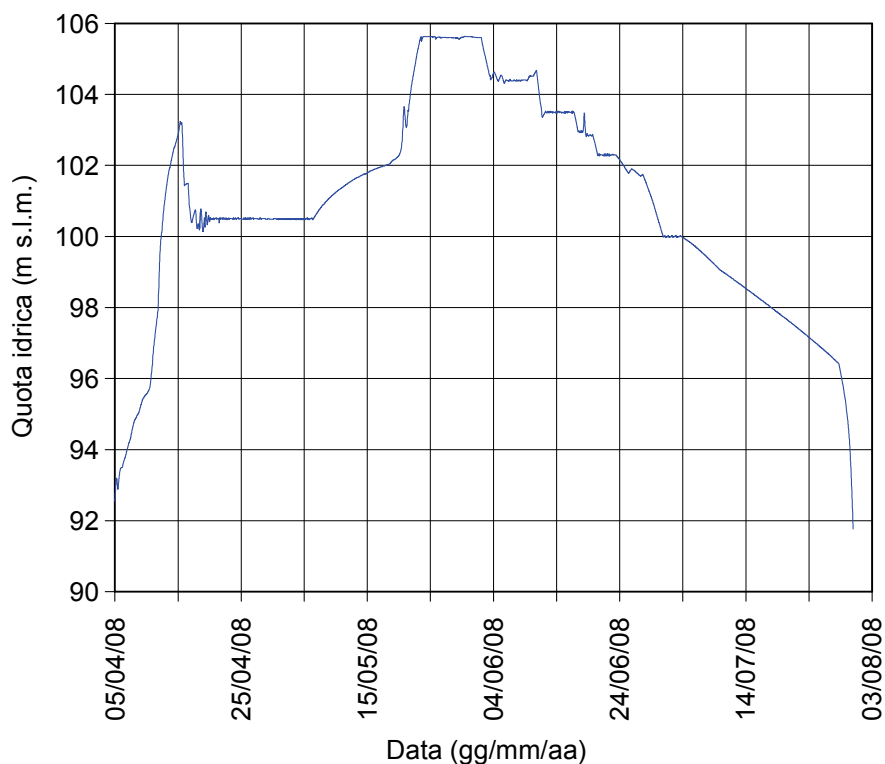


Figura 7-1 – Livelli di invaso nel periodo aprile-luglio 2008

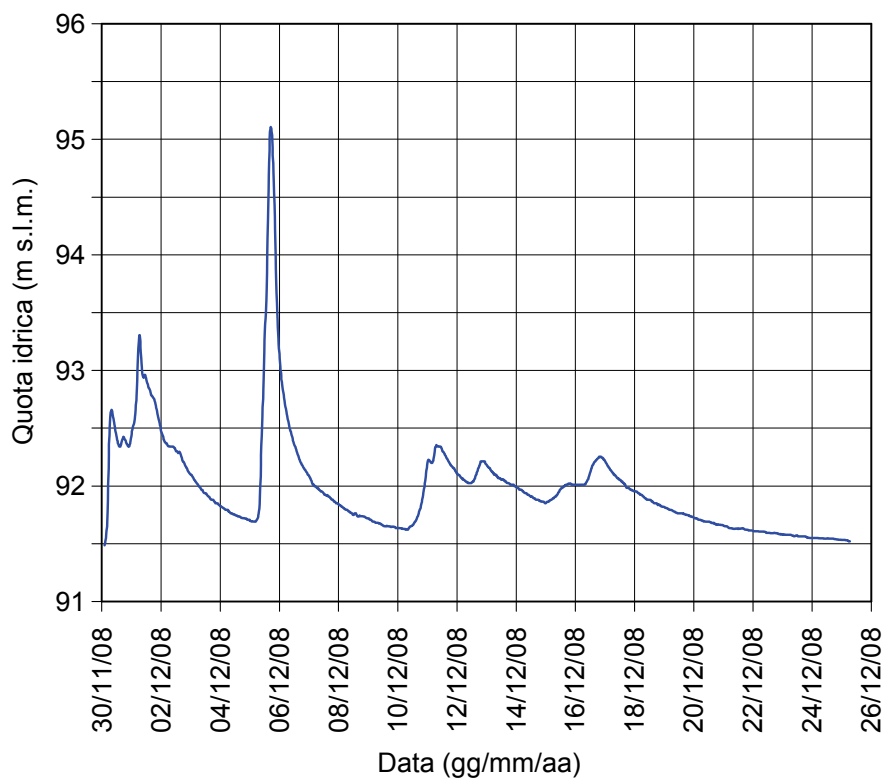


Figura 7-2 – Livelli di invaso nel periodo 30 novembre - 25 dicembre 2008

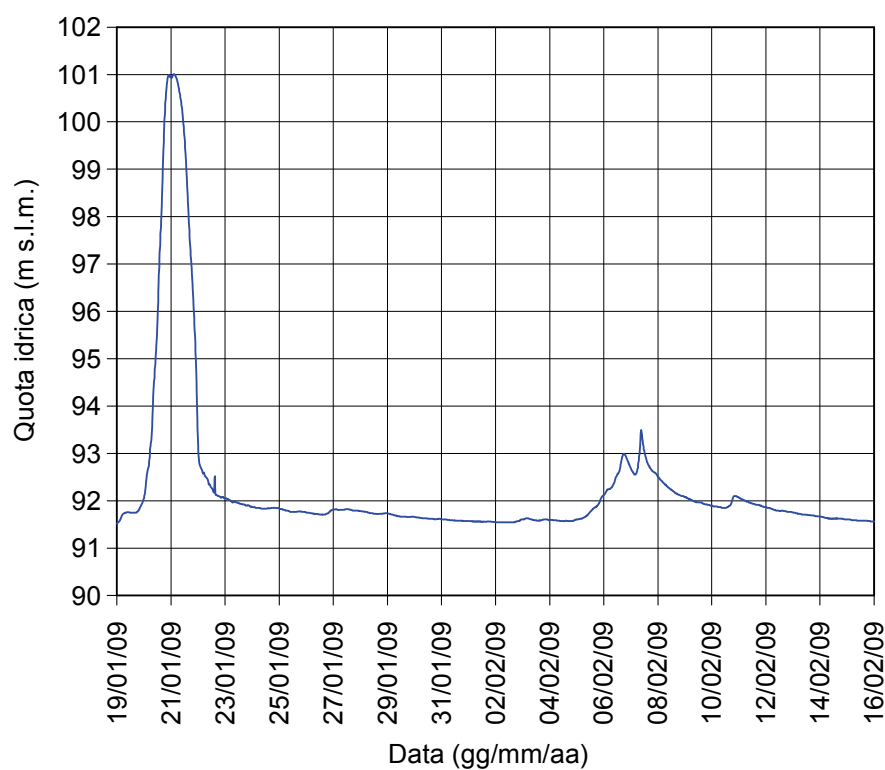


Figura 7-3 – Livelli di invaso nel periodo 19 gennaio – 16 febbraio 2009

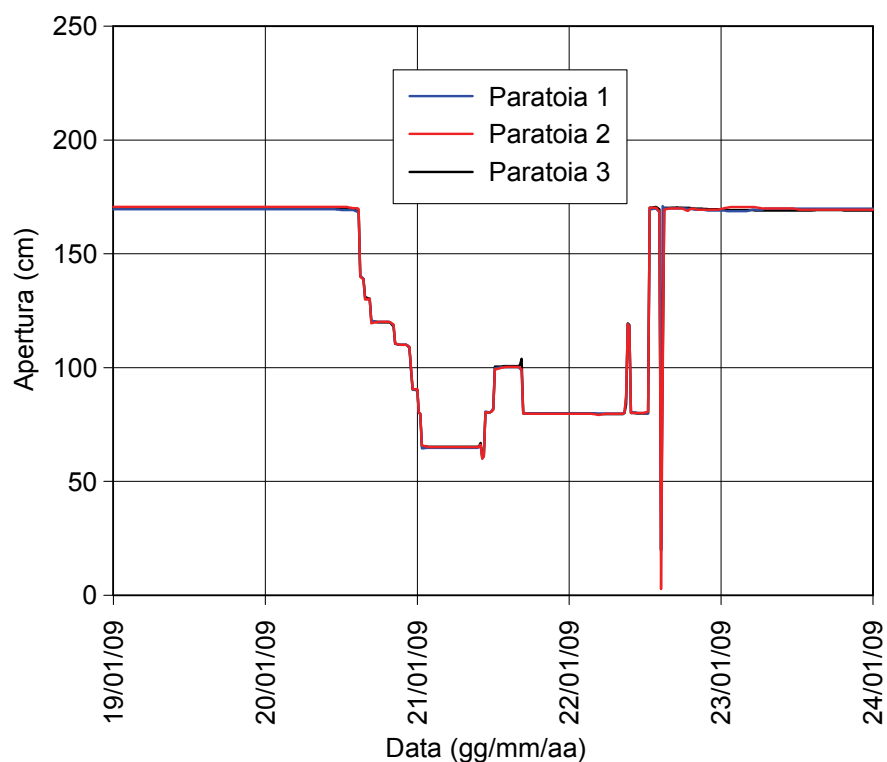


Figura 7-4 – Grado di apertura delle paratoie nel periodo 19 gennaio – 16 febbraio 2009

4. Periodo 4 giugno – 24 giugno 2009: In questo periodo la cassa è stata invasata per consentire all'ARPA di effettuare alcune indagini legate alla qualità delle acque. I sensori che forniscono l'indicazione dell'apertura delle paratoie erano però fuori servizio a causa di alcuni interventi manutentivi, per cui non è possibile risalire alle portate in uscita (peraltro modeste, visto che le paratoie erano quasi completamente chiuse) e, conseguentemente, a quelle in ingresso.

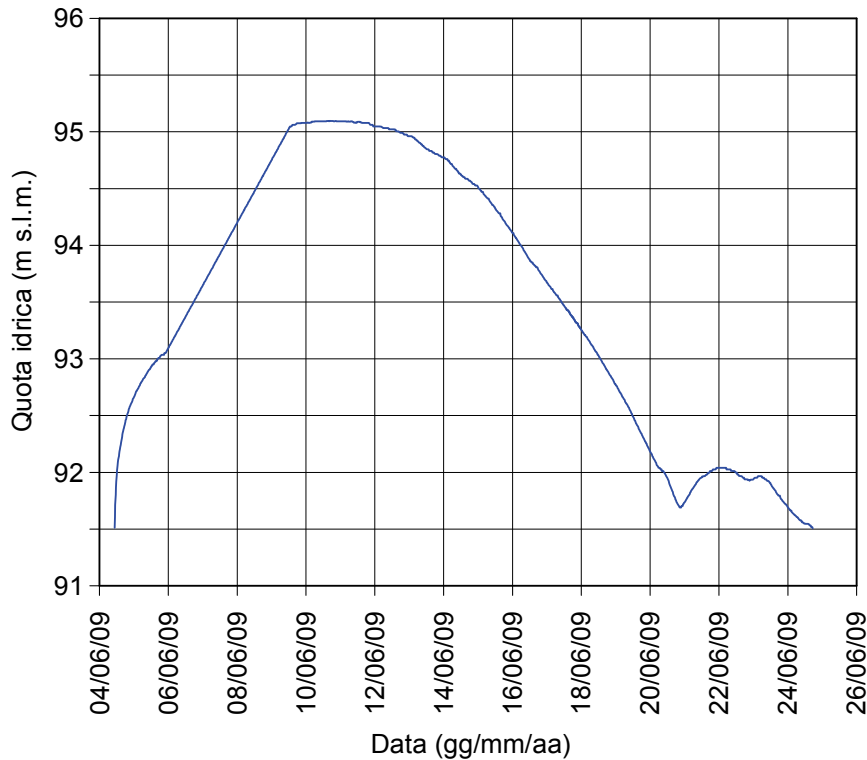


Figura 7-5 – Livelli di invaso nel periodo 4-24 giugno 2009

La ricostruzione delle portate in ingresso è stata effettuata come segue:

1. noto il grado di apertura delle paratoie si è determinata, con le scale delle portate ricavate al Capitolo 5, la portata complessivamente scaricata a valle;
2. dall'andamento temporale del livello idrico si è determinato il corrispondente andamento dei volumi invasati, sulla base della curva dei volumi riportata nell'Allegato D;
3. L'equazione di continuità è stata risolta mediante uno schema alle differenze finite centrato:

$$Q_e(t) \cong \frac{I}{\Delta t} \left[\int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} Q_u(t) dt + W(t + \Delta t/2) - W(t - \Delta t/2) \right] \quad (7.1)$$

I risultati sono riportati nelle Figure 7-6:7-9.

La Figura 7-6 riporta gli andamenti ricostruiti delle portate in ingresso ed in uscita nel periodo aprile-luglio 2008, durante la quinta fase delle prove di invaso. Si nota l'andamento molto irregolare delle portate in uscita, causato dalle manovre delle paratoie operate sia dal regolatore automatico che manualmente. Le portate in ingresso sono ovviamente molto più regolari e presentano il classico andamento delle onde di piena naturali, dovute agli apporti meteorici sul bacino.

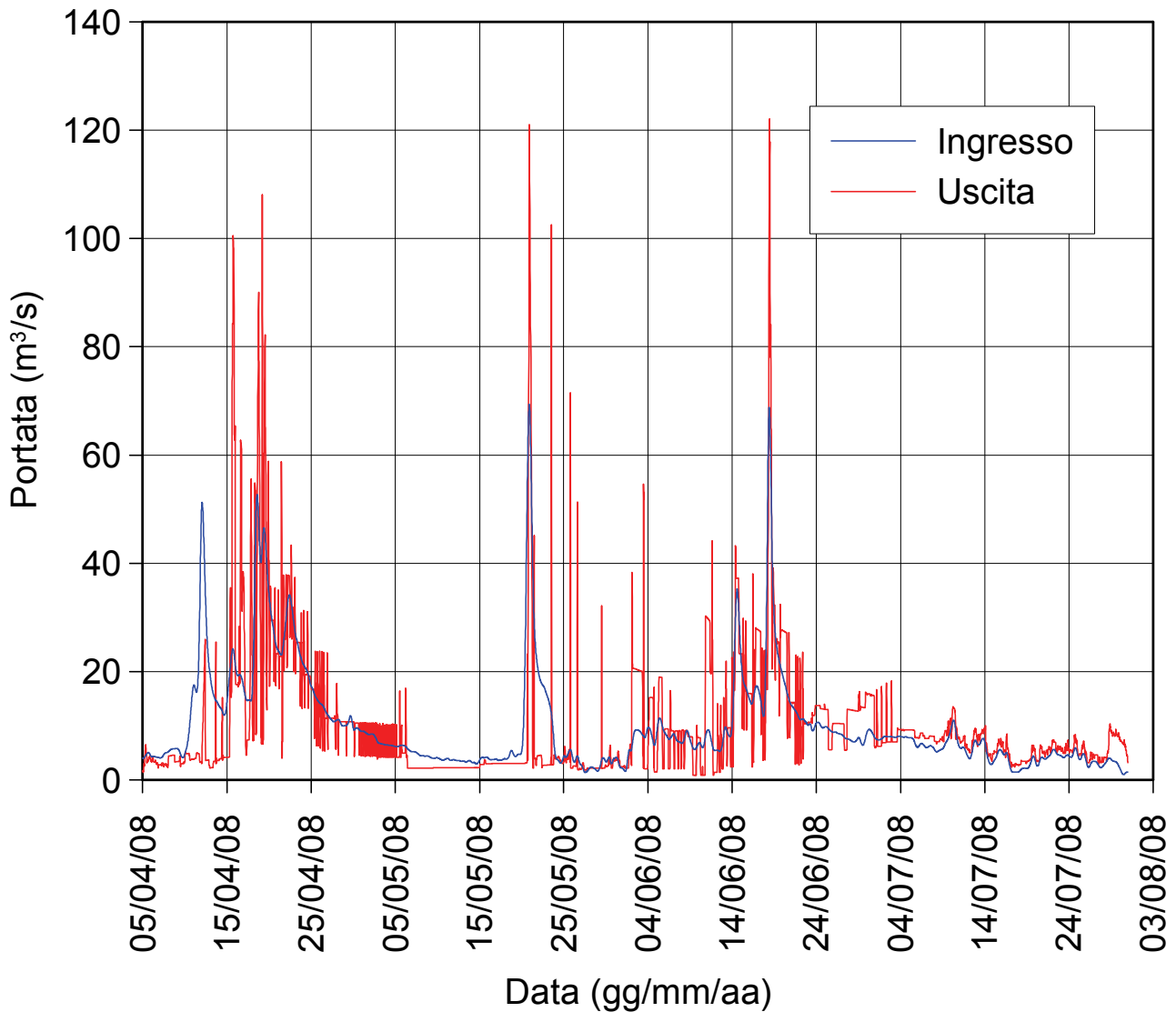


Figura 7-6 – Portate in ingresso ed in uscita nel periodo aprile-luglio 2008

La Figura 7-7 riporta gli andamenti ricostruiti delle portate in ingresso ed in uscita nel periodo 20 novembre – 25 dicembre 2008. L'andamento delle portate in uscita è in questo caso molto regolare, visto che le paratoie non sono state movimentate. L'effetto di laminazione operato dall'invaso è molto scarso, tant'è che gli andamenti delle portate in ingresso ed in uscita sono pressoché sovrapposti, salvo che in corrispondenza del colmo che si riduce da 240 m³/s (ingresso) a 213 m³/s (uscita) con un coefficiente di laminazione $\eta=0.89$ ed un'efficienza $e=1-\eta=0.11$.

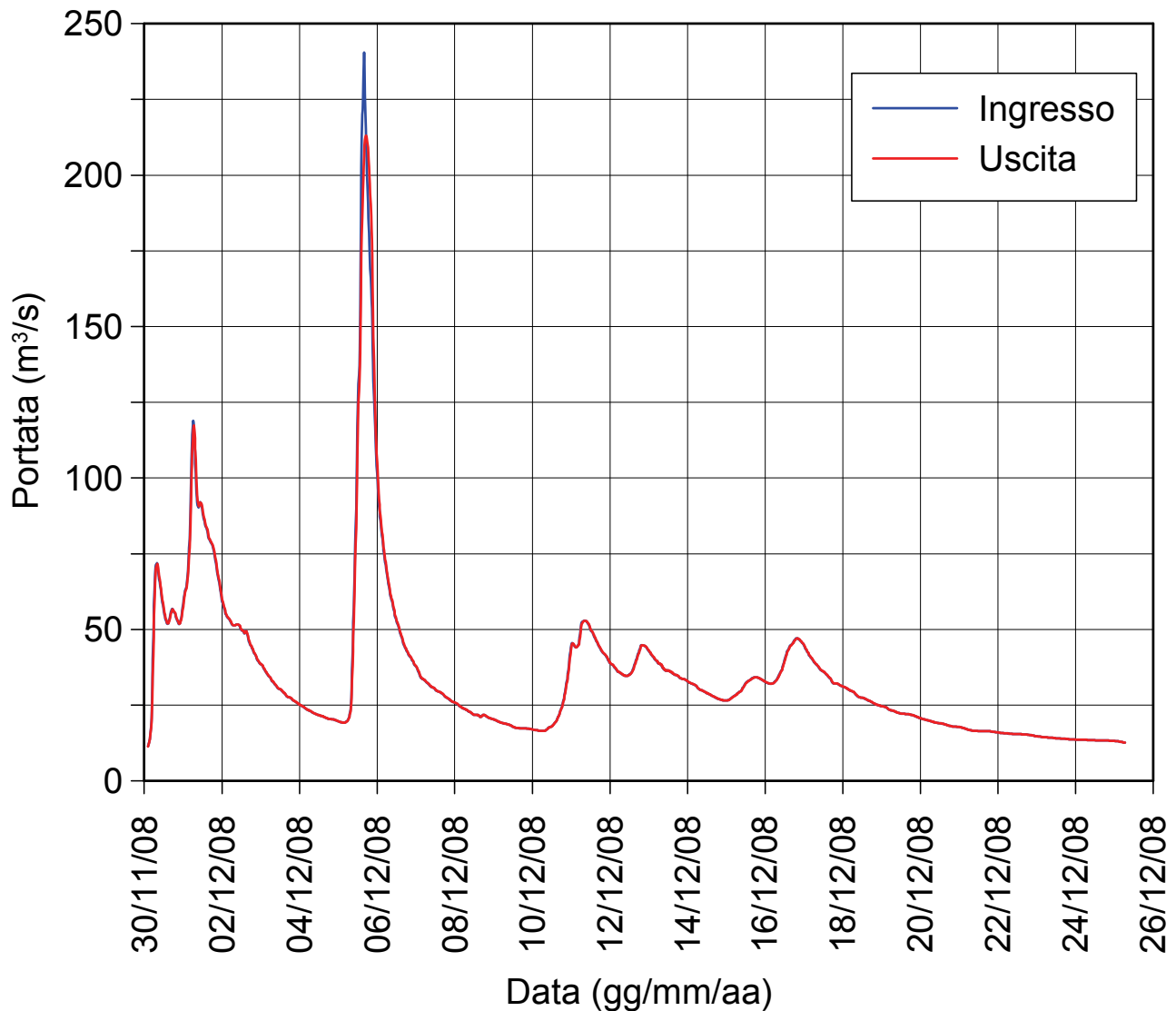


Figura 7-7 – Portate in ingresso ed in uscita nel periodo 30 novembre – 25 dicembre 2008

La Figura 7-8 riporta gli andamenti ricostruiti delle portate in ingresso ed in uscita nel periodo 19 gennaio – 16 febbraio 2009. L'andamento delle portate in uscita risulta sensibilmente influenzato dalle manovre effettuate sulle paratoie (cfr. Figura 7-4). Un dettaglio dei risultati nel periodo 19-24 gennaio 2009 è riportato in Figura 7-9. L'effetto di laminazione è in questo caso piuttosto accentuato, grazie al notevole volume invasato nella cassa, a sua volta incrementato dalle manovre di chiusura effettuate durante l'evento. La portata al colmo in ingresso, stimata in $450 \text{ m}^3/\text{s}$ si è ridotta in uscita a soli $280 \text{ m}^3/\text{s}$, con un coefficiente di laminazione $\eta=0.61$ ed un'efficienza $e=1-\eta=0.39$.

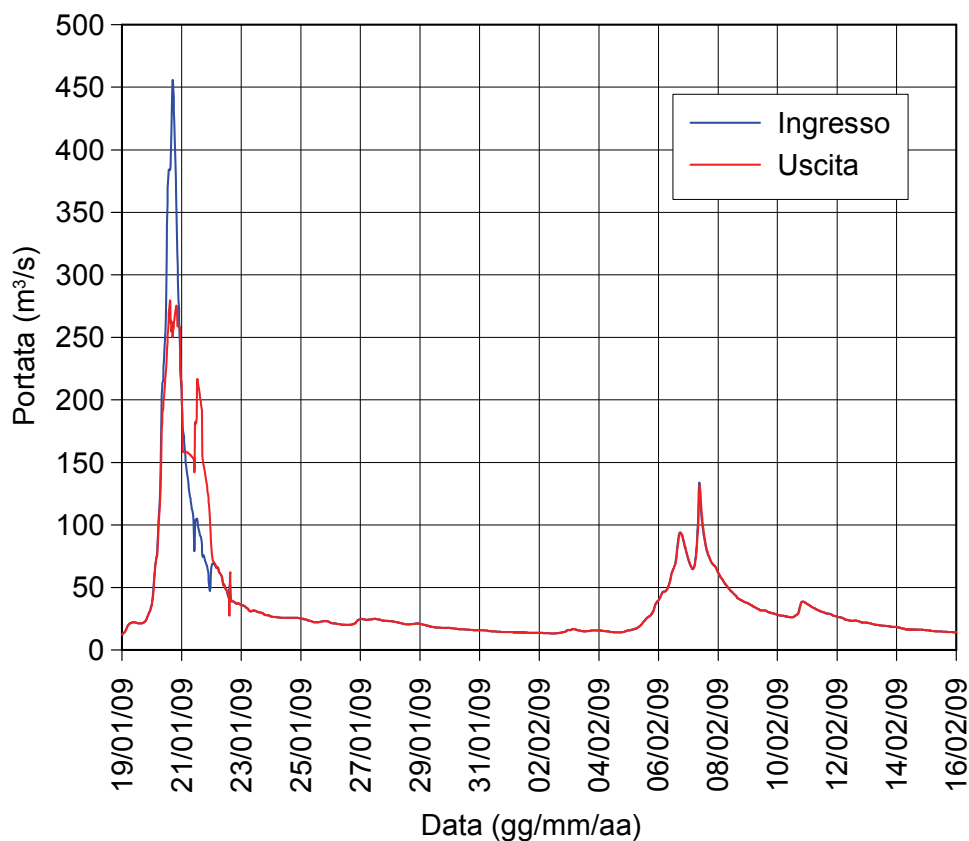


Figura 7-8 – Portate in ingresso ed in uscita nel periodo 19 gennaio – 16 febbraio 2009

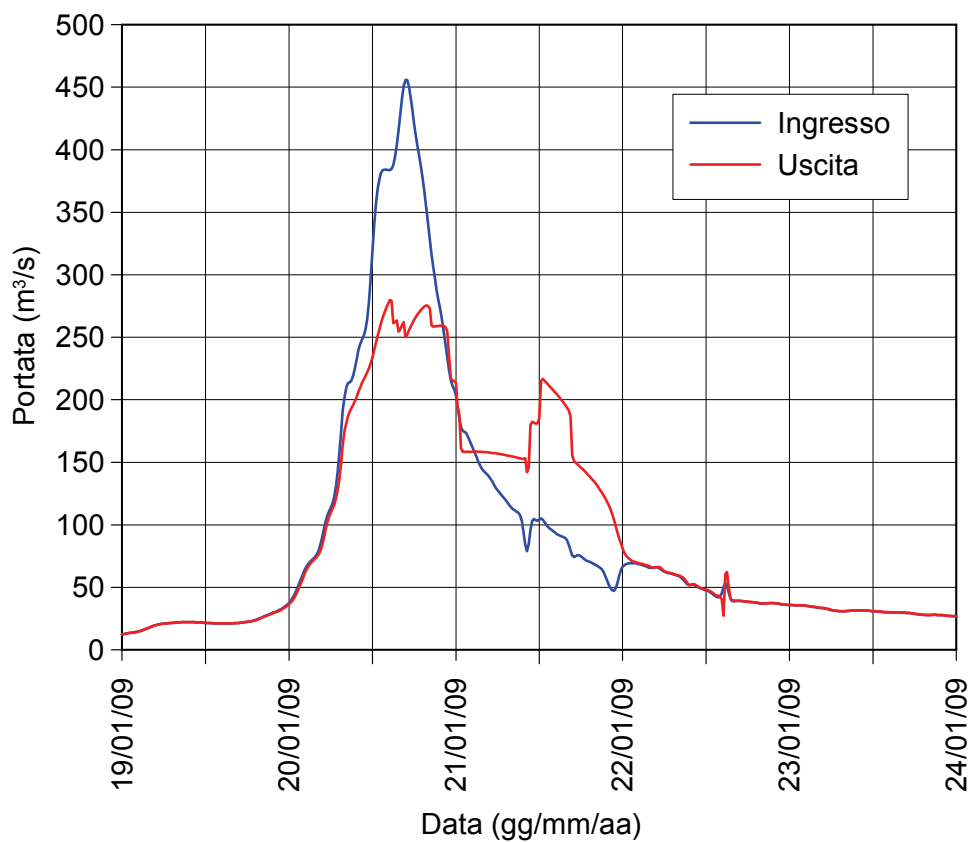


Figura 7-9 – Portate in ingresso ed in uscita nel periodo 19-24 gennaio 2009

8. MODALITA' OPERATIVE DI MOVIMENTAZIONE DELLE PARATOIE IN CONDIZIONE DI PIENA

Le luci di fondo della cassa di espansione sono dotate di paratoie regolabili. La movimentazione di tali paratoie è stata prevista, in fase di progetto, solo allo scopo di consentire l'effettuazione delle prove di invaso o per affinare la scala delle portate uscenti dal manufatto. Non è stata prevista invece una movimentazione delle paratoie in condizioni di piena. È però ragionevole supporre che, se adeguatamente governate, queste potrebbero portare ad una gestione più efficiente del volume d'invaso, rispetto ad un funzionamento ad apertura fissa.

Quest'ultimo aspetto merita qualche ulteriore approfondimento. Se fosse possibile identificare, per l'alveo a valle della cassa, un unico valore di portata sicuramente compatibile (ad es. $400 \text{ m}^3/\text{s}$), il funzionamento delle paratoie potrebbe essere facilmente asservito al livello di invaso secondo il seguente criterio: all'inizio dell'evento di piena le paratoie vengono mantenute totalmente aperte e tali rimangono fintantoché la portata in uscita risulti inferiore al prefissato valore di portata compatibile. Raggiunto tale limite le paratoie vengono progressivamente parzializzate in modo da mantenere, nonostante l'ulteriore aumento dei livelli di invaso nella cassa, una portata in uscita non superiore a quella compatibile. Nella fase calante le paratoie possono essere mantenute con il grado di apertura (chiusura) raggiunto durante la fase crescente dell'evento o, qualora si tema il sopraggiungere di altri eventi e si voglia accelerare lo svuotamento della cassa, possono essere progressivamente riaperte senza però mai provocare una portata uscente superiore a quella compatibile. Ciò garantirebbe di utilizzare il volume disponibile solo "quando serve", ovvero per tagliare esclusivamente il colmo della piena. Tale regola si traduce in una semplice relazione tra livelli di invaso ed apertura delle paratoie che potrebbe essere facilmente implementata, anche in automatico, in un software di gestione.

A valle della confluenza con il torrente Baganza, però, la portata complessiva in alveo risulta fortemente influenzata dai contributi di quest'ultimo corso d'acqua, che non può essere attualmente in alcun modo controllata. La portata più opportuna da rilasciare attraverso il manufatto regolatore della cassa di espansione del torrente Parma dovrebbe essere commisurata, quindi, alla contemporanea piena che si sviluppa nel torrente Baganza. Ciò rende estremamente complessa la gestione, richiedendo un robusto sistema di previsione di piena in tempo reale che sia in grado di fornire, con un sufficiente anticipo, l'evoluzione attesa della piena sia sul torrente Parma che sul torrente Baganza. Questo tema verrà ripreso nelle conclusioni della presente relazione ma è chiaro che, in mancanza di un simile sistema di previsione, le possibilità di regolazione in condizioni di piena sono limitate e che non si può far altro che considerare una prefissata portata compatibile.

Nel prosieguo della presente trattazione si è ritenuto di assumere come portata compatibile a valle della cassa il valore (costante) di $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'andamento della legge di efflusso a paratoie mobili può essere ricostruita come interpolare tra le diverse leggi di efflusso ottenute per prefissati valori di apertura. Nello specifico, sino alla portata limite di $400 \text{ m}^3/\text{s}$, le paratoie sono collocate a 2.50 m di apertura, in modo da garantire la massima portata evacuabile. Raggiunta la soglia di portata compatibile, una o più paratoie vengono progressivamente parzializzate, in modo da mantenere la portata in uscita costante. Nel caso in cui il livello idrico raggiungesse e superasse la quota di sfioro la portata non potrebbe più essere controllata e subirebbe degli ulteriori aumenti, ma questo dovrebbe verificarsi solo per eventi di tempo di ritorno superiore a quello di progetto ($T=100$ anni). La relazione sopra descritta è rappresentata graficamente in Figura 8-1, assieme alle scale delle portate relative all'apertura totale delle tre paratoie ed a quella con le tre paratoie parzializzate a 1.50 m, che la contengono.

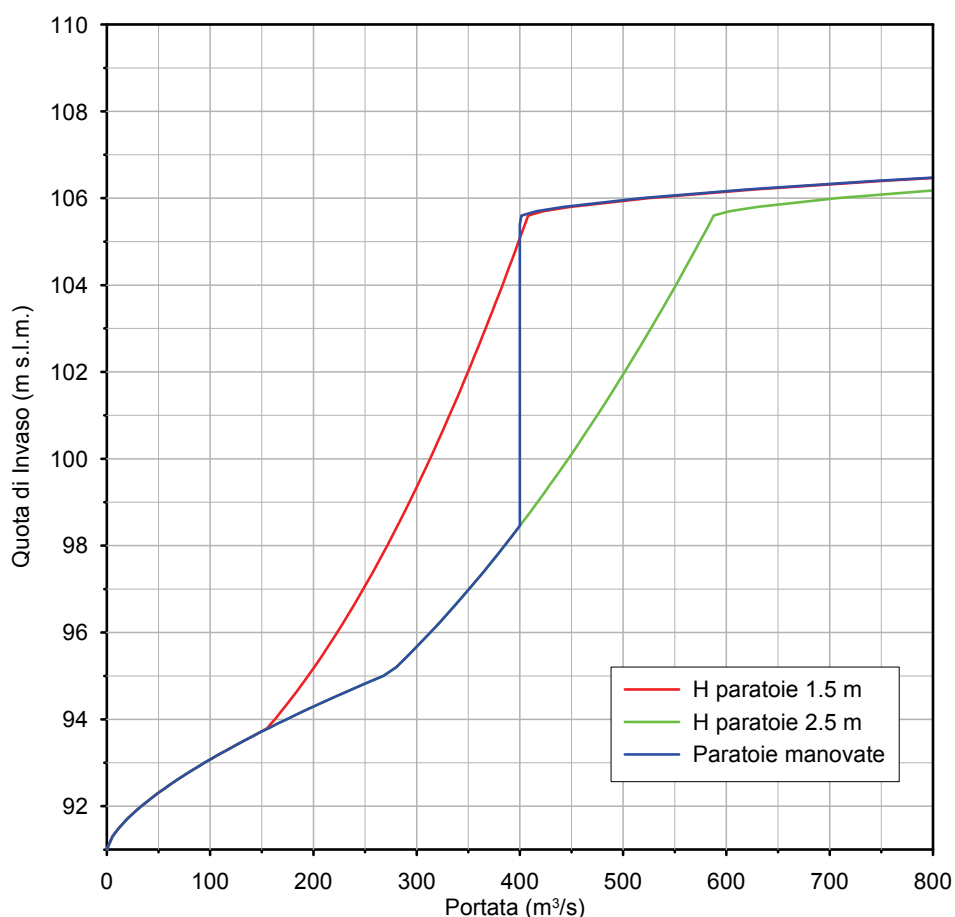


Figura 8-1 - Leggi di efflusso per paratoie fisse e manovrate

Per valutare l'effettivo miglioramento (o peggioramento) in termini di efficienza è necessario confrontare il comportamento della cassa di espansione in condizioni di paratoie fisse e di paratoie manovrate.

Si ricorda che l'efficienza è definita come:

$$e = 1 - \frac{Q_{out\ max}}{Q_{in\ max}} \quad (8.1)$$

dove $Q_{in\ max}$ massima portata in ingresso e $Q_{out\ max}$ la massima portata in uscita.

Dal momento che l'efficienza è funzione anche della portata in ingresso, le elaborazioni sono state condotte supponendo che la cassa fosse sollecitata da una serie di onde di piena di progetto. Tali onde di piena sono il risultato di precedenti studi teorici e sono caratterizzate da specifici tempi di ritorno. Si riporta, a titolo d'esempio, la rappresentazione grafica dell'andamento delle portate a seguito di un evento di piena pari a 200 anni di tempo di ritorno (Figura 8-2).

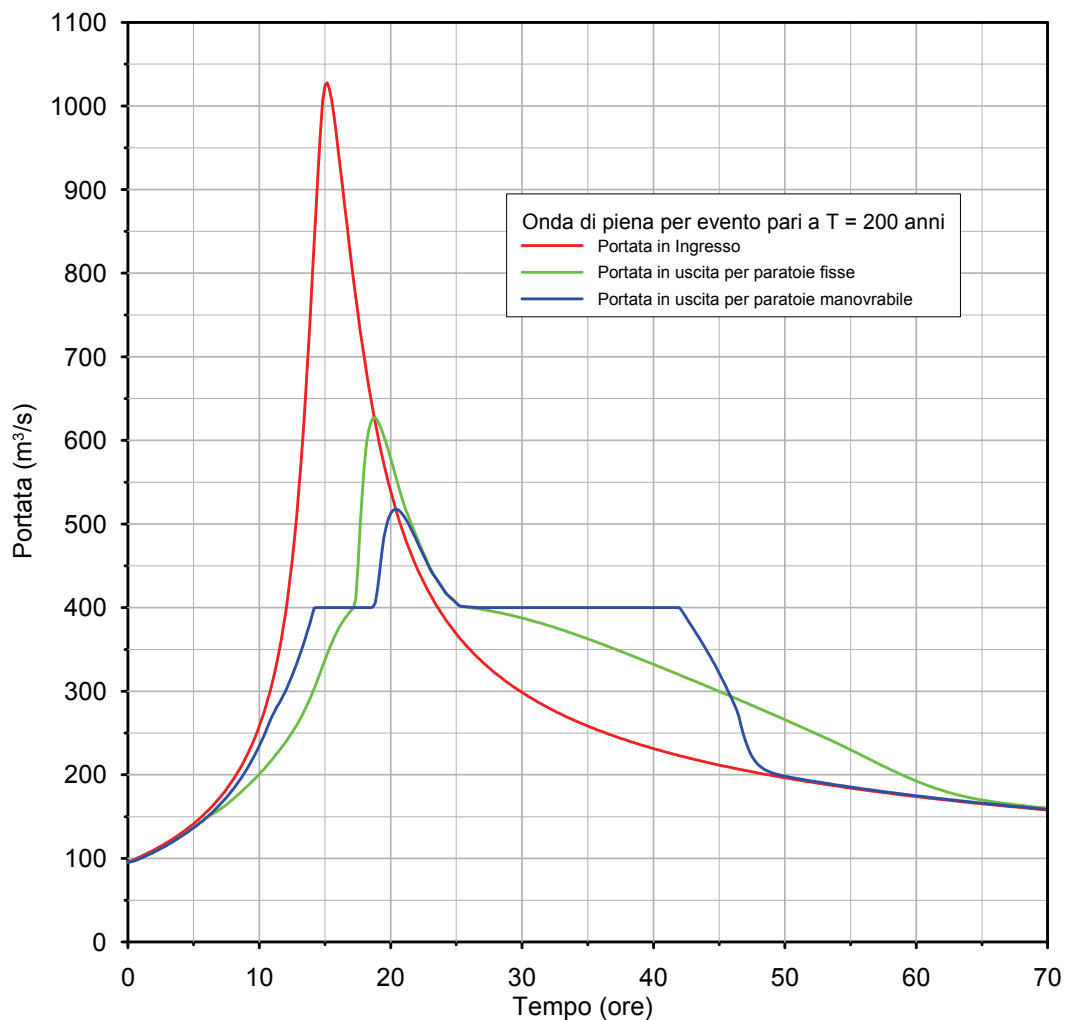


Figura 8-2 - Andamento delle onde di piena per evento con tempo di ritorno pari a 200 anni

Si può osservare come per il primo tratto dell'onda di piena, in condizioni di paratoie fisse, venga evacuata una minor portata, con una conseguente riduzione del volume utile d'invaso. A seguito di

ciò, il livello idrico nella cassa raggiunge prima la quota di sfioro, generando un sensibile aumento della portata massima evacuata. Attraverso la manovra delle paratoie viene aumentata l'efficienza della cassa, dal momento che nella fase crescente dell'onda di piena viene accumulato un minor volume di invaso.

È da evidenziare tuttavia come per eventi di piena meno significativi si abbia una riduzione di efficienza. La Figura 8-3 fa riferimento ad un evento di piena con tempo di ritorno pari a 50 anni. La massima portata scaricata in condizioni di paratoie fisse risulta in questo caso minore rispetto a quella allontanata in condizioni di paratoia manovrabile. Ciò non dovrebbe però creare preoccupazioni se la portata di 400 m³/s, che viene raggiunta in quest'ultimo caso, è davvero compatibile con l'alveo di valle.

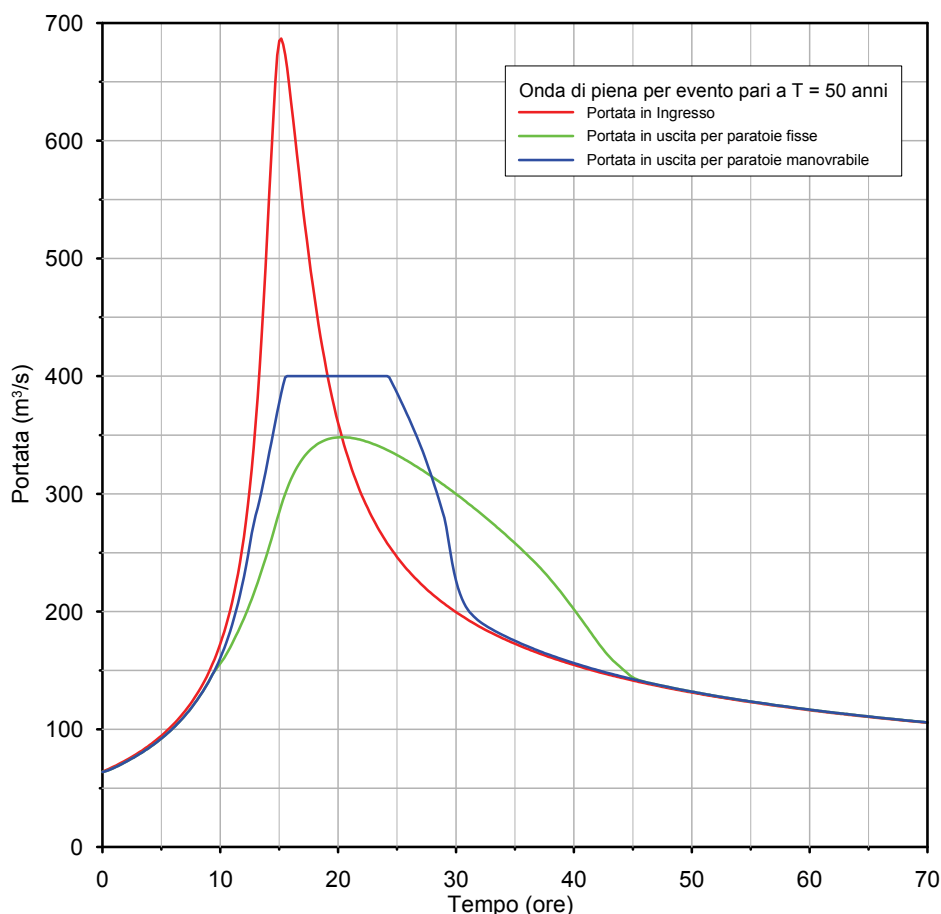


Figura 8-3 - Andamento delle onde di piena per evento con tempo di ritorno pari a 50 anni

Nella Tabella 8-1 sono riportati i risultati dell'andamento dell'efficienza e delle portate al colmo in uscita con paratoie fisse e mobili, al variare del tempo di ritorno dell'evento di piena. In Figura 8-4 è riportato, su un piano probabilistico (carta di Gumbel), l'andamento delle portate al colmo in ingresso ed in uscita. Dalla tabella e dalla figura si evince come, per eventi a basso e medio tempo di ritorno ($T < 50$ anni), l'efficienza della cassa venga, di fatto, peggiorata. Per $T = 100$ anni la

situazione è sostanzialmente equivalente, mentre per tempi di ritorno superiori ($T=200, 500$ anni) la regolazione in condizioni di piena garantisce un aumento dell'efficienza della cassa.

Tabella 8-1: Andamento dell'efficienza in funzione del tempo di ritorno

T (anni)	$Q_{e\ max}$ (m^3/s)	$Q_{u\ max}$ (m^3/s) (paratoie fisse)	Efficienza (paratoie fisse)	$Q_{u\ max}$ (m^3/s) (paratoie mobili)	Efficienza (paratoie mobili)
5	307	230	0.249	281	0.085
10	404	265	0.344	330	0.183
20	514	299	0.418	377	0.267
50	687	348	0.493	400	0.418
100	844	389	0.539	400	0.526
200	1028	627	0.390	518	0.496
500	1321	1070	0.190	976	0.261

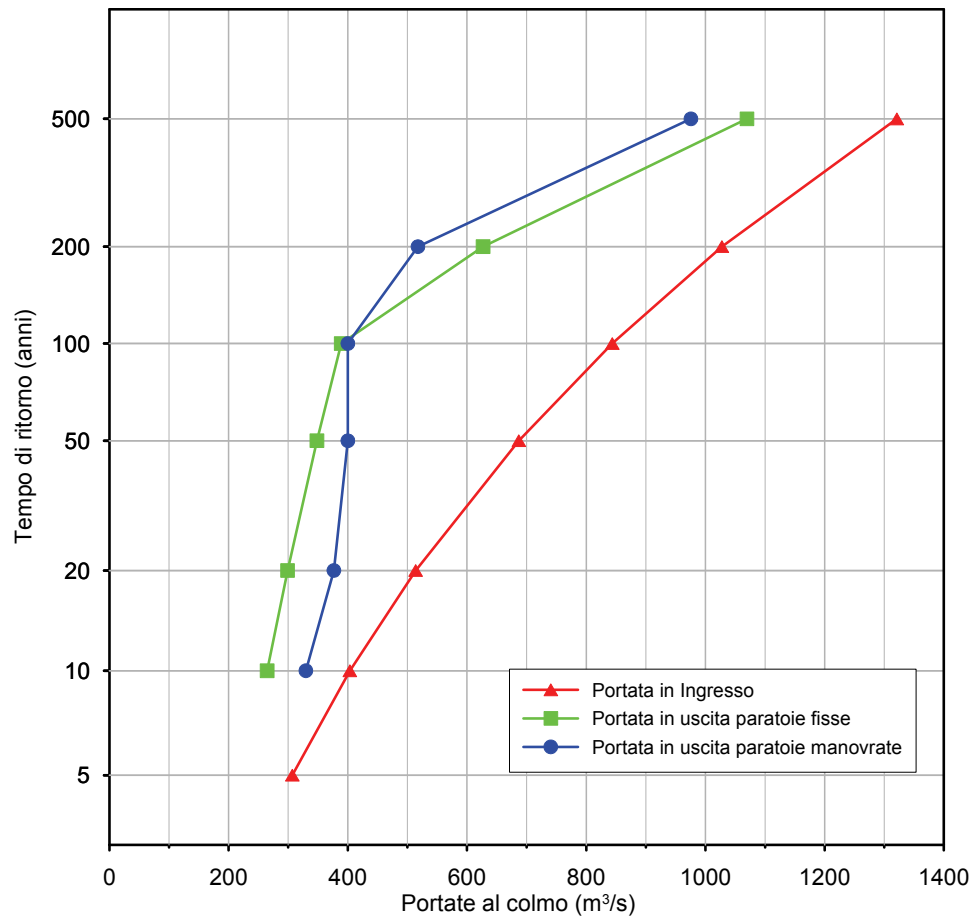


Figura 8-4 - Andamento delle portate al colmo in ingresso e in uscita dalla cassa, in funzione del tempo di ritorno.

8.1. Regolazione delle paratoie

La portata scaricata dalle luci di fondo è funzione esclusivamente del grado di apertura delle paratoie e del carico idrico a monte. Ne consegue che, fissato un determinato valore di portata (ad esempio $400 \text{ m}^3/\text{s}$), è possibile definire una relazione univoca tra l'apertura delle paratoie e la quota di invaso. Si è ritenuto opportuno ipotizzare la movimentazione di una sola paratoia, mantenendo le altre due in condizioni di massima apertura. Si può scrivere quindi:

$$Q_{(a)}(H) + 2 \cdot Q_{2.5}(H) = 400 \quad (8.2)$$

dove H è la quota idrica nell'invaso ed a indica l'apertura della paratoia che viene manovrata. La relazione tra l'apertura della paratoia e la quota idrica di monte tale da soddisfare la (8.2) è riportata in Figura 8-5.

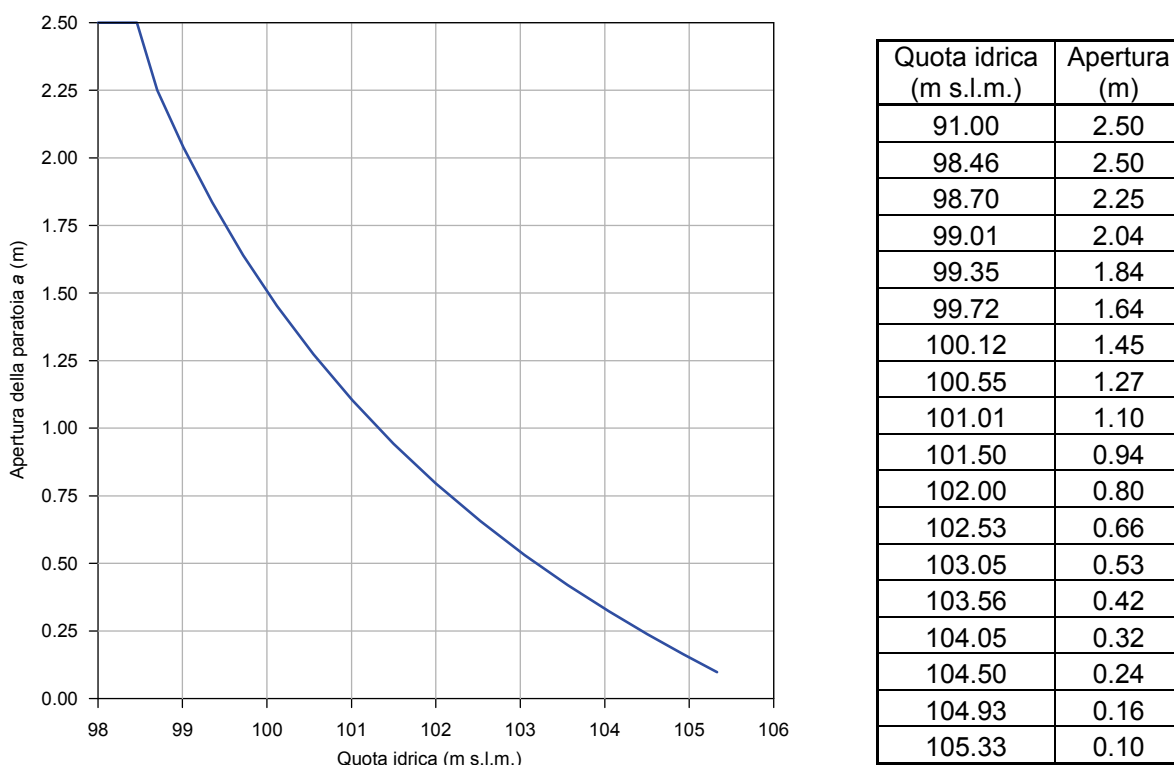


Figura 8-5 – Apertura di una singola paratoia in funzione della quota di invaso tale da garantire una portata in uscita costante pari a $400 \text{ m}^3/\text{s}$ supponendo le restanti paratoie siano mantenute a totale apertura ($a=2.50 \text{ m}$).

In conclusione, per garantire una portata uscente non superiore a $400 \text{ m}^3/\text{s}$ occorre:

1. mantenere tutte le paratoie alla massima apertura fino a che nell'invaso non si raggiunga una quota idrica di circa 98.50 m s.l.m.
2. chiudere progressivamente una paratoia secondo l'andamento riportato in Figura 8-5 al crescere del livello di invaso, mantenendo le altre due paratoie completamente aperte. Si noti che incidentalmente alla quota di sfioro (105.60 m s.l.m.) la paratoia manovrata risulterebbe in pratica totalmente chiusa.

9. CONCLUSIONI

9.1. Manufatto.

Le misure effettuate durante le prove di invaso e le analisi svolte ai capitoli precedenti fanno ritenere che vi sia un collegamento diretto tra invaso e acquifero superficiale, soprattutto nella parte destra del manufatto e che l'acquifero profondo non sia completamente separato da quello superficiale. La presenza del cunicolo di drenaggio e, presumibilmente, dei giunti non completamente sigillati tra le piastre costituenti il pavimento della vasca di dissipazione limitano comunque le quote piezometriche sottoplatea a valori non superiori a 90 m s.l.m., garantendo coefficienti di sicurezza al sollevamento delle piastre sempre abbondantemente superiori ad 1.3.

9.2. Arginature.

Gli andamenti temporali delle quote piezometriche registrate ai piezometri posti al piede esterno dell'argine, sia in sponda destra che sinistra, hanno presentato escursioni massime tra l'inizio delle prove ed il colmo non superiori a 4-5 metri. La minima soggiacenza rispetto alla corrispondente quota del piano campagna, pari a circa 2 metri (in destra) e a 4 metri (in sinistra) appare rassicurante nei riguardi della tenuta dei diaframmi e dei nuclei impermeabili degli argini.

Si ritiene comunque indispensabile approfondire ulteriormente la conoscenza sulla struttura dell'argine sinistro in corrispondenza della strada carraia che porta al coronamento (punto 5 in Figura 1-2) ove è già stata effettuata una tomografia elettrica.

Non si è pervenuti ad una completa conoscenza della struttura dell'argine neppure in corrispondenza della sezione L, i cui piezometri posti al limite esterno del coronamento arginale avevano mostrato durante le prove di invaso un comportamento anomalo, nonostante l'effettuazione di tre carotaggi obliqui volti ad individuare l'ubicazione del diaframma e del nucleo di argilla. Si ribadisce comunque che le quote piezometriche registrate dai piezometri sulla banca intermedia ed al piede d'argine sono tranquillizzanti ai fini del comportamento di tenuta dell'argine stesso.

9.3. Problematiche emerse e proposte di approfondimento

Nel seguito sono riportate alcune problematiche emerse durante il periodo di monitoraggio della cassa ed alcuni spunti per studi ed approfondimenti futuri.

1. Come più volte ricordato, lo strumento ad immersione che è attualmente installato per la misura dei livelli nella cassa non è in grado di funzionare al di sotto di quota 91.50 m s.l.m.; a questo livello ed in condizioni di efflusso a pelo libero con le tre paratoie aperte corrisponde una portata uscente dal manufatto regolatore di circa $12 \text{ m}^3/\text{s}$, la quale viene superata mediamente solo 45

giorni all'anno. Per tutto il rimanente periodo (ammesso che la gestione dell'invaso non modifichi sostanzialmente il regime naturale) non è possibile determinare la portata uscente dal manufatto. Poiché si ritiene che la conoscenza del regime completo delle portate sia utile, si suggerisce di predisporre un sistema di misura anche per le portate più modeste. Una possibile soluzione sarebbe quella di strumentare opportunamente la prima briglia di ingresso alla cassa di espansione. Ivi è già presente un misuratore di livello che però non è in grado di funzionare proprio a causa della sua infelice ubicazione e per il quale, comunque, non è disponibile una scala di deflusso tarata.

2. La presenza di paratoie regolabili consentirebbe di mantenere nella cassa un volume di invaso non nullo, da utilizzare per molteplici scopi come, ad esempio, a) il rilascio di piccole portate nell'alveo in modo da garantire una continuità del corso d'acqua anche durante i periodi estivi, b) la produzione di energia idroelettrica, c) l'alimentazione di canali irrigui adiacenti, d) la creazione di un habitat utile per l'insediamento di uccelli acquatici, e) lo svolgimento di attività ricreative, ecc.. Ciò richiederebbe ulteriori studi volti a definire il regime delle portate in ingresso e, soprattutto, a valutare quantitativamente quale influenza possa avere una ritenuta iniziale non nulla sull'efficienza dell'invaso ai fini della laminazione delle piene, che deve rimanere lo scopo primario della cassa.
3. La presenza di paratoie regolabili consentirebbe anche di ottimizzare il funzionamento della cassa in condizioni di piena. Un modo di operare semplice, teso a migliorare l'efficienza della cassa per eventi di tempo di ritorno elevati, è stato affrontato nel Capitolo 8 della presente relazione. E' stato però più volte sottolineato come la portata più opportuna da rilasciare a valle non possa essere assunta costante poiché essa è fortemente influenzata dalla contemporanea piena che si sviluppa nel torrente Baganza. Sarebbe difficilmente giustificabile, di fronte all'opinione pubblica, una gestione della cassa che provocasse l'allagamento di aree sensibili (in particolare in corrispondenza dell'abitato di Colorno) senza il contemporaneo riempimento totale dell'invaso. Una simile circostanza sarebbe del tutto naturale in presenza di una cassa priva di organi mobili, ma non sarebbe accettata nel caso della cassa sul torrente Parma, in cui vi è una possibilità di manovra. Paradossalmente, una gestione delle paratoie lontana dall'ottimale, che operasse una chiusura quasi totale delle paratoie e l'immagazzinamento, inutile, di una cospicua parte del volume iniziale della piena, e portasse così al riempimento totale dell'invaso ed addirittura all'entrata in funzione dello sfioratore di superficie, sarebbe più facilmente "difendibile" di fronte ad un'opinione pubblica (non tecnica) poiché "oltre a riempire l'invaso, cos'altro si sarebbe potuto fare?". Ne è una riprova la recente piena del 19-20 gennaio 2009 dopo la quale, nonostante una più che adeguata gestione dell'emergenza, si sono levate numerose voci

critiche, del tutto prive di fondamento, sull'operato dell'AIPO. E' bastato infatti che venissero coinvolte dalla piena aree golenali e l'invaso non venisse totalmente riempito per far dire da più parti che "si sarebbe potuto fare di più...". In attesa della sperata realizzazione della cassa di espansione sul torrente Baganza, che aggiungerebbe un'ulteriore possibilità di controllo delle piene del sistema Parma-Baganza, sembra quindi poco proponibile una qualsiasi gestione che non preveda una regolazione delle paratoie di tipo dinamico, cioè asservita all'evento che si sta sviluppando ed in grado di auto-adattarsi. Questo modo di operare complica però enormemente il problema, poiché richiede la realizzazione di un modello di previsione di piena, sia sul bacino del torrente Parma che su quello del torrente Baganza, robusto ed affidabile. Tale modello dovrebbe essere in grado di ricevere in ingresso, in tempo reale, tutte le informazioni relative allo stato del sistema (precipitazioni già verificatesi su tutti i pluviografi del bacino e su quelli adiacenti, portate che stanno transitando in corrispondenza delle sezioni di misura) nonché contenere un modulo di previsione di pioggia quantitativo (anch'esso collegato alle previsioni meteorologiche). Poiché il modello, per quanto robusto ed affidabile, non può prevedere situazioni particolari, che spesso influiscono sensibilmente sull'evoluzione dell'evento, esso dovrà essere del tipo auto-adattativo, ovvero essere in grado in continuo di adattare i propri parametri all'evoluzione dell'evento in atto. A questo scopo è pertanto indispensabile conoscere, con sufficiente accuratezza, l'andamento delle portate in ingresso alla cassa di espansione. Tali informazioni potranno essere dedotte o per via diretta, realizzando l'installazione di misura posta in corrispondenza della prima briglia in ingresso alla cassa, ovvero per via indiretta, attraverso la procedura di de-laminazione presentata al Capitolo 6 che, a partire dai livelli nella cassa e dall'apertura delle paratoie, consente di ricostruire le portate in ingresso alla cassa stessa.

Alla luce di queste considerazioni si propone pertanto la prosecuzione dell'attività di collaborazione tra AIPO e DICATeA.