



DIREZIONE TERRITORIALE IDROGRAFICA – EMILIA ROMAGNA ORIENTALE

UFFICIO OPERATIVO DI MODENA

OPERE IDRAULICHE di 2<sup>a</sup> CATEGORIA

ESERCIZIO 2022 - FIUME PANARO

(MO-E-428-M) – (C.O. 1323) – CUP: B47H21004410001

Lavori di manutenzione straordinaria delle opere elettromeccaniche della Cassa di Espansione sul Fiume Panaro per gli involucri sperimentali propedeutici al Collaudo ai sensi dell'Art. 14 del DPR 1363/59, in Comune di San Cesario sul Panaro e Modena (MO).

Interventi per il contrasto ai moti di infiltrazione ed opere complementari.

## Relazione Geologica e Geotecnica

Allegato n.: 2

**Progettisti:**

l'Istruttore Idraulico

(Geom. Daniele Picardi)

Il Funzionario Tecnico

(Ing. Giuseppe Mirarchi)

l'Istruttore Tecnico Polifunzionale

(Dott. Marcello Mantovani)

l'Istruttore Idraulico

(Geom. Clemente Bottone)

**Visto:** Il Responsabile del Procedimento  
(Ing. Massimo Valente)

Data: 18/10/2022

**Collaboratori:**

Il Funzionario Tecnico  
(Ing. Enrico Borinato)



**UNIMORE**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
MODENA E REGGIO EMILIA

# ANALISI DEI MOTI DI FILTRAZIONE NELLE ARGINATURE DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL FIUME PANARO: CALIBRAZIONE DEI MODELLI DI FILTRAZIONE E ANALISI DELLE PROVE DI INVASO PREVISTE

a cura di

Giovanni Moretti e Stefano Orlandini

Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari  
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia  
Via Vivarelli 10, 41125 Modena  
[www.idrologia.unimore.it](http://www.idrologia.unimore.it)

PRIMA RELAZIONE DELLA CONVENZIONE DI RICERCA

STUDIO CONDOTTO NELL'AMBITO DELLA CONVENZIONE DI RICERCA TRA UNIMORE E AIPO DAL TITOLO:  
"STUDIO DELLE INTERAZIONI IDRAULICHE E IDROLOGICHE TRA OPERE DI SBARRAMENTO FLUVIALE,  
CORRENTI IDRICHE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE, CON RIFERIMENTO AI MANUFATTI REGOLATORI E ALLE  
ARGINATURE DI CONTENIMENTO: SVILUPPO, VALIDAZIONE E APPLICAZIONE DI MODELLI MATEMATICI DI  
COMPORTAMENTO DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL FIUME PANARO NEL COMUNE DI SAN CESARIO SUL  
PANARO (MO), DEL BACINO IDROGRAFICO DI MONTE E DEL SISTEMA FLUVIALE DI VALLE – ATTIVITÀ DI  
SECONDA FASE E COMPLETAMENTO."

Modena, 6 dicembre 2021

## SOMMARIO

Il presente studio ha la finalità di definire il comportamento dei rilevati arginali della Cassa di Espansione del Fiume Panaro ed è composto da due relazioni. Nella prima relazione, la presente, per ciascuna sezione arginale di interesse, nella quale sono installati i piezometri, è stato definito un modello di filtrazione utilizzando il software Feflow. Tali modelli sono stati calibrati sollecitando le arginature con i livelli osservati nella cassa in occasione della piena del dicembre 2020 e della prima prova sperimentale di invaso del maggio 2021 e confrontando i risultati ricostruiti con i dati osservati nei piezometri. I modelli sono poi stati utilizzati per simulare l'evoluzione della saturazione nei corpi arginali nel caso in cui vengano sollecitati con i livelli previsti per la seconda e la terza prova d'invaso così come definite nel programma degli invasi sperimentali del collaudo. Poiché come verrà ampiamente illustrato in seguito, tali invasi sollecitano considerevolmente i corpi arginali portando all'emersione a lato campagna della linea di saturazione in molteplici sezioni, nella parte 1 della seconda relazione si propone una diversa e più breve prova sperimentale di invaso che permetta, da un lato di sollecitare comunque in modo adeguato le arginature, dall'altro di garantire che la linea di filtrazione si attesti a quote inferiori al piano campagna. Infine nella parte 2 della seconda relazione, utilizzando sempre i modelli calibrati nella presente prima relazione, si riportano i risultati ottenuti sollecitando le arginature con un idrogramma caratterizzato da un livello massimo pari alla quota di massima regolazione e velocità di riempimento e svuotamento comparabili con quelle delle piene naturali. In tal modo si simula una sollecitazione legata ad un evento di piena maggiore di quella osservata durante la piena del dicembre 2020.

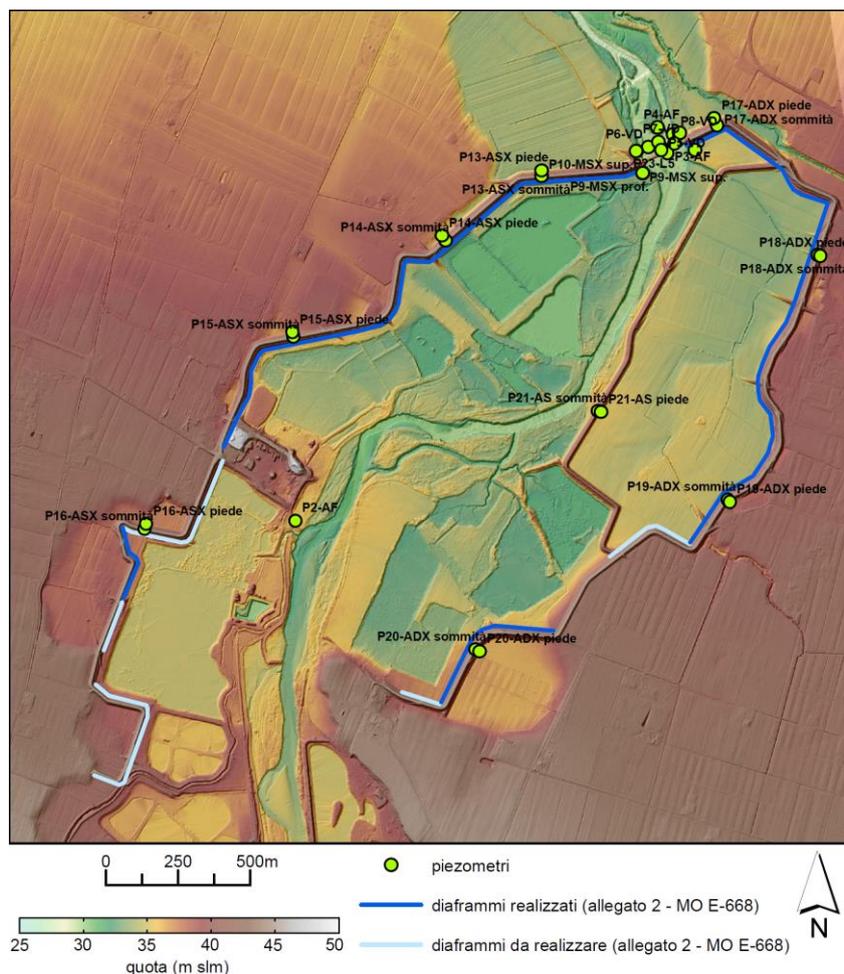
## INTRODUZIONE

La cassa di espansione del fiume Panaro è situata in località Sant'Anna nel Comune di San Cesario sul Panaro ed è costituita da un manufatto principale in calcestruzzo che funge da sbarramento del corso d'acqua ammorsato attraverso due corpi di spalla a un sistema di arginature maestre che sottende un invaso in linea. All'interno dell'invaso in linea è presente uno sfioratore laterale che regola il deflusso verso un invaso sussidiario fuori linea. L'invaso fuori linea è anch'esso contenuto all'interno delle arginature maestre dell'invaso in linea, ma risulta protetto da un argine interno secondario sormontabile. Il manufatto regolatore principale è dotato di 5 scarichi di fondo principali muniti di paratoie regolabili e 4 scarichi di fondo laterali di servizio. L'altezza della sommità arginale rispetto al piano campagna varia considerevolmente per le diverse sezioni considerate. Le arginature si elevano per circa 10 metri in prossimità del manufatto regolatore ma tale elevazione si riduce anche al di sotto dei 5 metri nei tratti a monte in particolar modo in destra idraulica. Tali differenze sono legate, come è evidenziato anche in Figura 1, dalla presenza di un terrazzo fluviale. Le arginature in alcuni casi insistono sulla scarpata del terrazzo e quindi il piano campagna esterno dell'arginatura si trova a una quota più alta. In altri casi invece, le arginature insistono sulla piana alluvionale recente e quindi la sommità arginale sul lato esterno si erge considerevolmente rispetto al piano campagna. Queste differenze di elevazione portano a conseguenti differenze di sagoma arginale. La differente elevazione della sommità arginale rispetto al piano campagna, la diversa sagoma e la posizione della falda, portano le sezioni considerate a risposte molto differenti quando sollecitate da livelli elevati che permangono all'interno dell'invaso per lungo tempo. Il cedimento di questo sistema di opere di ritenuta può portare alla formazione di onde di esondazione che possono interessare potenzialmente una vasta area compresa tra le provincie di Modena, Bologna e Ferrara così come descritto nella relazione "Propagazione delle onde di esondazione generate dell'ipotetico collasso della cassa di espansione di Sant'Anna sul fiume Panaro". Pertanto, sia per la gestione delle prove sperimentali di invaso che per l'esercizio, si è ritenuto opportuno sviluppare i modelli di filtrazione delle differenti sezioni arginali descritti in seguito.

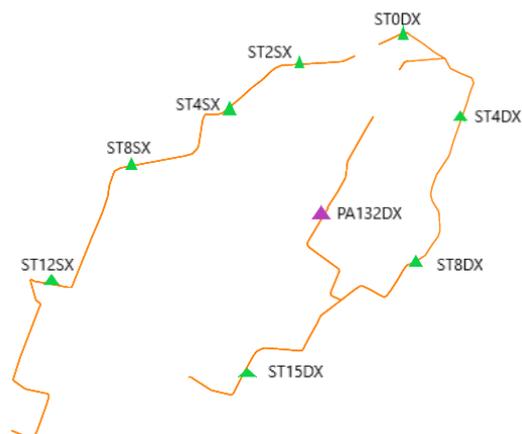
## METODI

Per costruire i modelli di filtrazione di ciascuna sezione arginale presa in esame, si è utilizzato il software Feflow. Le sezioni arginali considerate sono quelle in cui sono stati installati i piezometri riportati in Figura 1 e riassunte in Figura 2. Di queste sezioni si è definita la stratigrafia in base all'analisi delle carote estratte durante l'installazione dei piezometri stessi. La geometria di ciascuna sezione considerata è basata sulle sagome arginali di progetto integrate dai dati altimetrici ricavati dai Modelli Digitali del Terreno a risoluzione 1 m x 1 m, derivati dai recenti rilievi Lidar. Il dominio di calcolo che caratterizza ciascuna sezione si estende per almeno un centinaio di metri dal piede dell'arginatura sia lato cassa che lato campagna. La maglia di calcolo triangolare con cui è stato discretizzato il dominio di calcolo è stata opportunamente raffittita in corrispondenza dei piezometri e del diaframma. È stato scelto, per ogni sezione strumentata, di costruire domini bidimensionali nell'ipotesi che durante gli invasi il gradiente idraulico che si viene ad instaurare a seguito delle differenze di quota tra il livello all'interno del serbatoio e la falda a campagna sia tale che si può supporre che la direzione prevalente dei moti di filtrazione che si instaurano, e il relativo campo di velocità, sia perpendicolare allo sviluppo del corpo arginale. Si è supposto quindi che le velocità nella direzione parallela al corpo arginale possano essere in questo caso del tutto trascurabili. I modelli bidimensionali di ciascuna sezione offrono inoltre uno strumento più flessibile e computazionalmente efficiente per la simulazione delle differenti sollecitazioni a cui i corpi arginali possono essere sottoposti. Il software Feflow, risolvendo l'equazione di Richard in regime non stazionario permette la descrizione dei moti di filtrazione in un suolo saturo e insaturo. Tale possibilità è stata sfruttata per descrivere la risposta delle arginature alla sollecitazione non stazionaria determinata dalla variazione del livello all'interno della cassa di espansione durante l'evento di piena del dicembre 2020 e durante la prima prova di invaso eseguita nel maggio 2021. Tali eventi, di cui è nota la sollecitazione idraulica e i valori del carico osservati dai piezometri, hanno permesso la calibrazione della conducibilità idraulica dei differenti strati di terreno che costituiscono le sezioni arginali. Questa operazione è stata effettuata per tutte le sezioni eccetto per quelle posizionate sull'arginatura principale a contenimento della cassa sussidiaria che non sono mai state bagnate poiché la cassa sussidiaria non è mai stata allagata. Per tali sezioni, come verrà riportato in dettaglio di seguito, sono stati considerati valori di conducibilità idraulica analoghi a quelli ottenuti nelle sezioni limitrofe aventi le medesime stratigrafie. Tale assunzione è stata supportata dalla generale ricorrenza dei materiali costituenti le successioni stratigrafiche e dalla omogeneità delle conducibilità idrauliche nelle diverse sezioni riscontrata a parità di materiale. Tali evidenze sono emerse nell'analisi delle sezioni interessate dalla variazione del livello nei due eventi presi in considerazione. I valori di conducibilità idraulica definiti nel processo di calibrazione sono riportati in Tabella 1. L'unico materiale per il quale, con le sollecitazioni a disposizione non è stata possibile una calibrazione accurata, è stato il materiale costituente il corpo arginale. Per tale motivo sono stati considerati due valori differenti di conducibilità del corpo arginale. La scelta sui valori considerati è stata effettuata prendendo come riferimento i risultati delle prove di conducibilità su campioni di materiale dell'argine del fiume Secchia estratti poco a valle della rotta del 2014 in località San Matteo. Sebbene si tratti di un corso d'acqua differente e la sezione arginale si trovi più a valle rispetto alla zona di transizione tra alta pianura e bassa pianura in cui è posta la cassa di espansione, il materiale dell'argine del fiume Secchia dedotto dall'analisi granulometrica è una sabbia limosa come il materiale costituente i corpi arginali considerati nel presente studio. Pertanto i valori considerati, in mancanza di calibrazione, sono i valori estremi dell'intervallo di variazione osservato nei provini dell'argine del fiume Secchia. Le conducibilità idrauliche considerate sono pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  e  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Per ogni materiale i valori di conducibilità considerati ricadono nell'intervallo di valori caratteristici riportati in letteratura. Come evidenziato in Figura 1 le arginature perimetrali, eccetto alcuni tratti per i quali i diaframmi sarebbero ancora da realizzare, dovrebbero essere generalmente caratterizzate da un diaframma in calcestruzzo lato fiume che si sviluppa in profondità per 10 metri. Tale diaframma all'interno dei modelli è stato equiparato ad un materiale con conducibilità idraulica molto ridotta pari a  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ . I modelli di filtrazione così definiti per ogni sezione sono stati poi utilizzati per analizzare

la risposta delle arginature alle sollecitazioni previste durante la seconda prova di invaso (Figura 3) e la terza prova di invaso (Figura 4) come sono state definite nel programma degli invasi sperimentali del collaudo. Poiché i risultati dipendono dalla quota della falda, si è proceduto, per l'analisi delle risposte legate alla seconda e alla terza prova di invaso, ad effettuare più simulazioni per ogni sezione considerando diversi valori della quota iniziale della falda. Per ogni sezione sono stati considerati i valori della quota iniziale di falda compresi tra il valore minimo e il valore massimo tra quelli osservati nei quattro anni di funzionamento della rete di piezometri, con particolare attenzione al valore della quota della falda all'inizio della prima prova di invaso nel maggio 2021. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per ciascuna delle sezioni considerate.



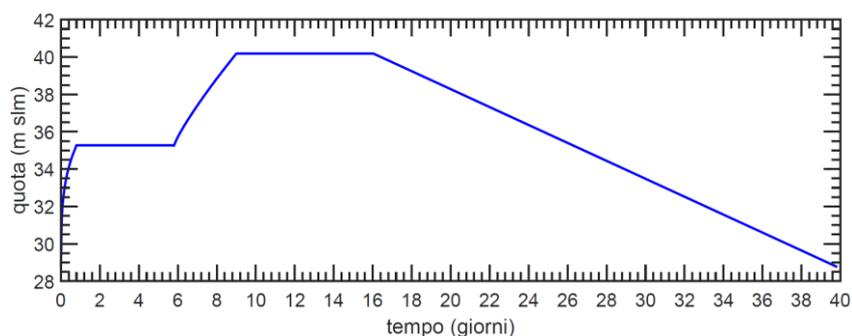
**Figura 1.** L'andamento plano-altimetrico della Cassa di Espansione del Fiume Panaro e delle zone ad essa limitrofe ottenuto utilizzando un modello digitale del terreno a risoluzione 1 m x 1 m. Sono inoltre evidenziati i tratti di arginatura in cui sono stati realizzati i diaframmi (linea blu) e quelli in cui il diaframma è da realizzare (linea azzurra). Infine è riportata la posizione dei piezometri.



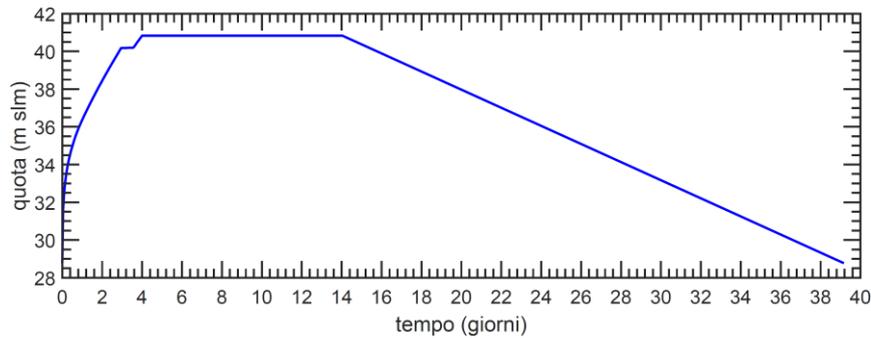
**Figura 2.** Schema riassuntivo delle arginature della Cassa di Espansione con evidenziate le posizioni delle sezioni considerate in questo studio, nelle quali sono ubicati i piezometri riportati in Figura 1.

	$K_s (m s^{-1})$
Ghiaia	$5 \times 10^{-3}$
Sabbia ghiaiosa	$1 \times 10^{-5}$
Sabbia limosa	$1 \times 10^{-6} \div 8 \times 10^{-6}$
Limo	$1 \times 10^{-6}$
Argilla	$1 \times 10^{-8}$

**Tabella 1.** Nella tabella sono riportati i valori della conducibilità idraulica alla saturazione utilizzati nei modelli descritti di seguito. Tali valori sono stati ottenuti partendo da valori di letteratura per ciascuno dei materiali e calibrati utilizzando i valori osservati dai piezometri durante gli eventi della piena del dicembre 2020 e della prima prova di invaso del maggio 2021. Per la sabbia limosa materiale dello strato che utilizzando i due eventi non si è potuto calibrare, si sono considerati i due valori riportati.



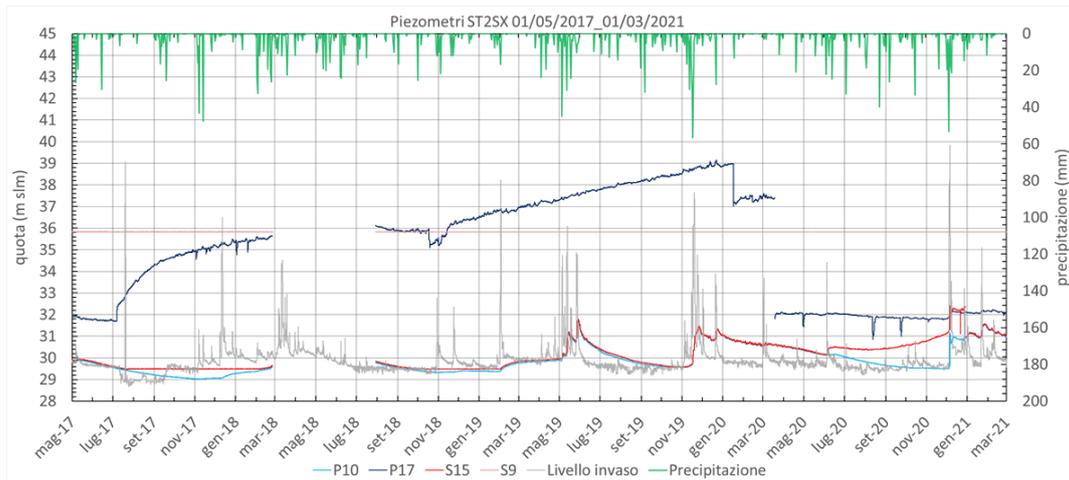
**Figura 3.** Andamento del livello all'interno della cassa di espansione previsto dalla seconda prova di invaso come definito nel programma degli invasi sperimentali di collaudo.



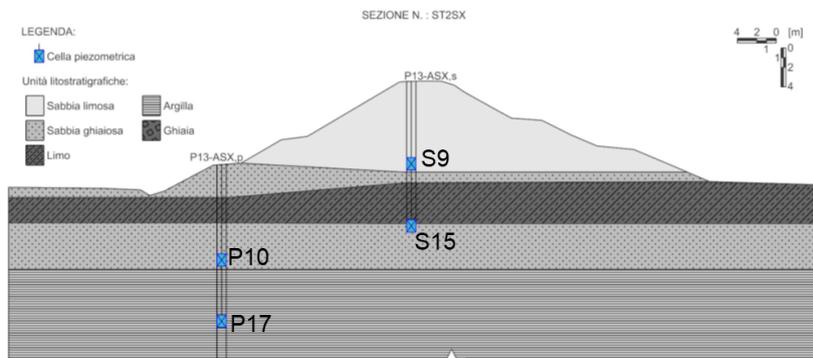
**Figura 4.** Andamento del livello all'interno della cassa di espansione previsto dalla terza prova di invaso come definito nel programma degli invasi sperimentali di collaudo.

## SEZIONE ST2SX, PIEZOMETRI P13 – ASX

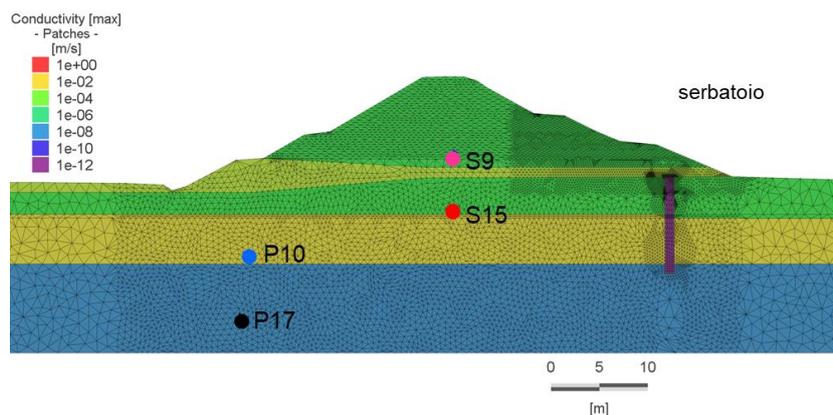
La sezione ST2SX come è riportato nella Figura 1 e nella Figura 2 è situata in sinistra idraulica in prossimità del manufatto regolatore. La sezione si trova nella porzione di arginatura principale che, perpendicolare all'alveo fluviale, attraversa la piana alluvionale. La sezione è quindi caratterizzata da un elevato dislivello tra la sommità arginale e il piano campagna esterno alla cassa. I livelli di falda osservati dagli strumenti installati si attestano ad una quota comparabile alla quota del pelo libero a cui si attestano le portate di magra. Come si nota in Figura 5 le osservazioni registrate dai piezometri, la cui posizione è riportata in Figura 6, presentano alcune anomalie. In particolare il piezometro S15 nell'autunno 2020 ha un andamento crescente che si discosta dal piezometro P10. Nonostante alcune anomalie è stato possibile definire un modello, la cui porzione in corrispondenza del corpo arginale è riportata in Figura 7, che ricostruisce in modo sufficientemente accurato i due eventi significativi del dicembre 2020 e del maggio 2021 come riportato in Figura 8 e Figura 9. Tali risultati confermano la presenza del diaframma come da progetto. Nelle figure si può notare come il piezometro P17 sembri essere collegato ad un acquifero più profondo meno sensibile alle variazioni di carico nel serbatoio. Il piezometro S9 non è sollecitato dagli eventi e ciò ha reso difficile una calibrazione del valore della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale. Per tale motivo come già anticipato in precedenza il modello della sezione così definito è stato utilizzato per simulare le sollecitazioni della seconda e della terza prova di invaso previste dal programma degli invasi utilizzando due differenti valori di conducibilità idraulica. Nella Tabella 2 e nella Figura 10 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Nella Tabella 3 e nella Figura 11 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . I risultati variano al variare della conducibilità idraulica e delle condizioni iniziali della falda. Inoltre la terza prova di invaso si dimostra più gravosa della seconda. Per un valore iniziale della falda pari al livello osservato nel maggio 2021 all'inizio della prima prova di invaso, riportato nelle tabelle con l'asterisco, le due prove di invaso non portano la falda ad emergere al lato campagna dell'arginatura. Tale fenomeno si manifesta solo in corrispondenza di livelli iniziali di falda più elevati che, come si evince dalla Figura 5, nel periodo di funzionamento dei piezometri si sono manifestati raramente.



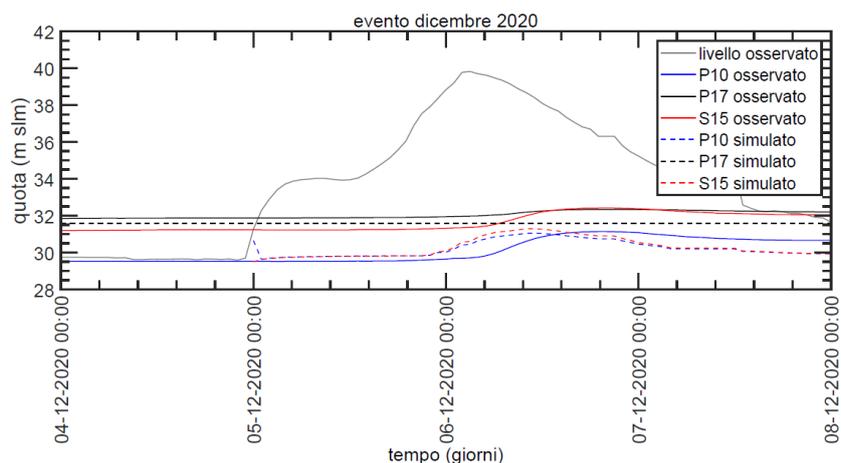
**Figura 5.** Andamento dei carichi osservati dai piezometri installati nella sezione ST2SX. Si possono notare alcune anomalie delle osservazioni per il piezometro P17 e S15.



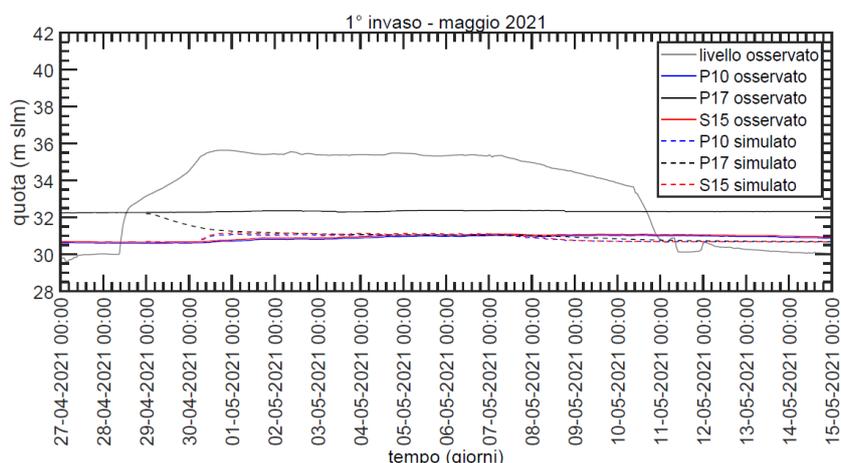
**Figura 6.** La stratigrafia ottenuta dall'analisi delle carote estratte durante l'installazione dei piezometri stessi. Nell'immagine è evidenziata anche la posizione delle celle piezometriche.



**Figura 7.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. I diversi valori di conducibilità idraulica mettono in evidenza come da progetto anche la presenza del diaframma di lunghezza pari a 10 m che è stato simulato imponendo una conducibilità pari a  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ . Nell'immagine è evidenziata la posizione delle celle piezometriche.



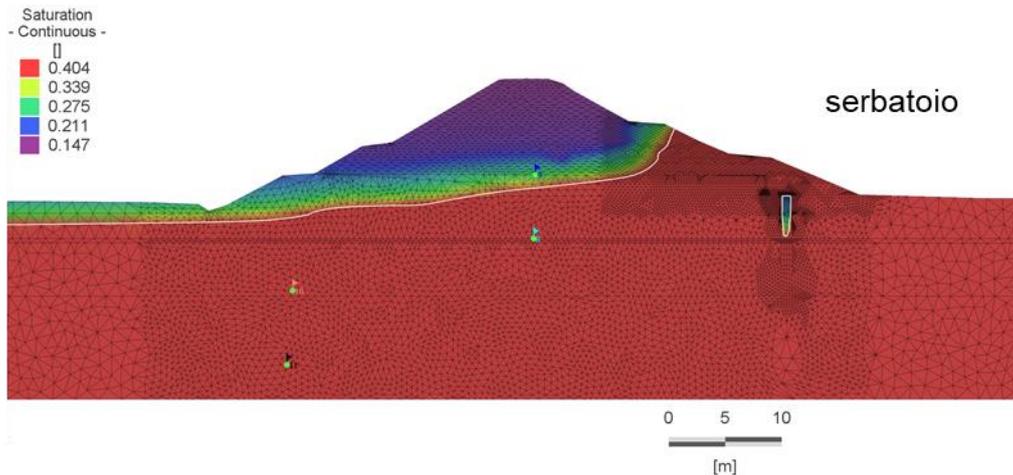
**Figura 8.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per l'evento di piena del dicembre 2020. Il piezometro S9 che non è sollecitato dall'evento, non è stato riportato in figura. I valori osservati del piezometro S15 presentano delle anomalie rilevate anche in Figura 3. Il piezometro P17 sembra essere collegato ad un acquifero più profondo meno sensibile alle variazioni di carico.



**Figura 9.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per la prima prova di invaso del maggio 2021. Il piezometro S9 che non è sollecitato dall'evento, non è stato riportato in figura. Il piezometro P17 sembra essere collegato ad un acquifero più profondo meno sensibile alle variazioni di carico, il modello costruito se da un lato riesce a catturare bene la dinamica degli strati più superficiali, fatica a descrivere quella dello strato più profondo sul lungo periodo.

	quota iniziale della falda (m slm)			
2° invaso	29.5	30.5 <sup>(*)</sup>	31.0	31.5
3° invaso	29.5	30.5 <sup>(*)</sup>	31.0	31.5

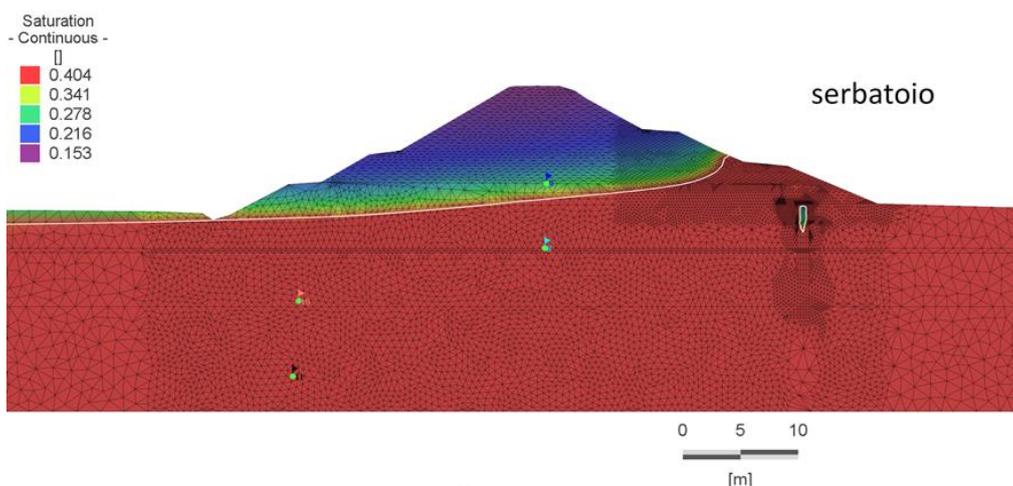
**Tabella 2.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenziano i casi in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.



**Figura 10.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 31.5 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

	quota iniziale della falda (m slm)			
2° invaso	29.5	30.5 <sup>(*)</sup>	31.0	31.5
3° invaso	29.5	30.5 <sup>(*)</sup>	31.0	31.5

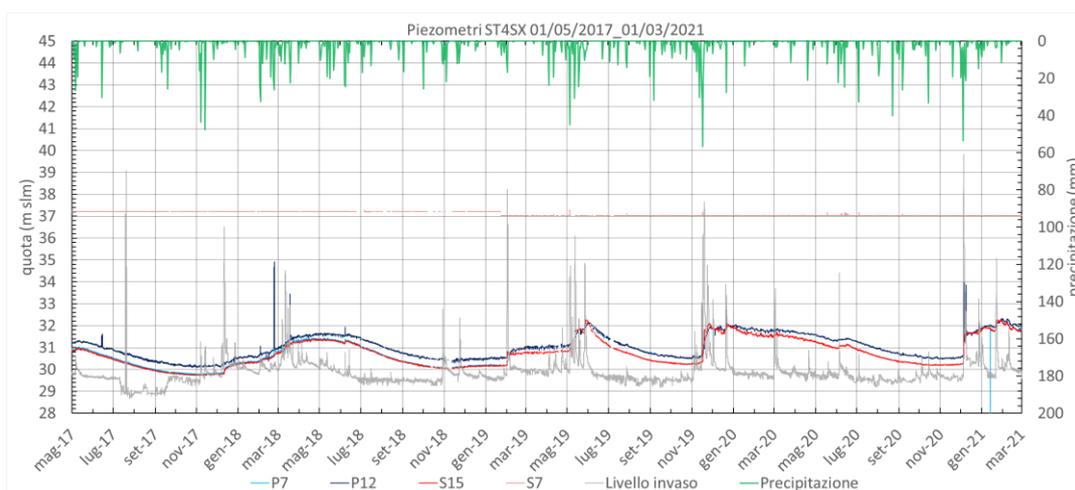
**Tabella 3.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1 \text{ m}$ . Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.



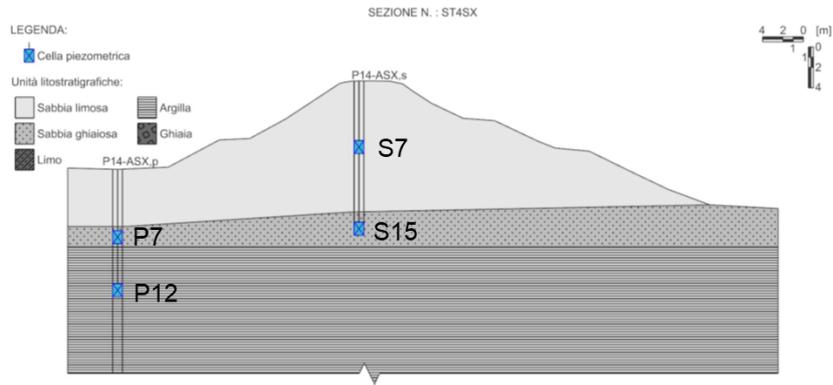
**Figura 11.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 31.5 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

## SEZIONE ST4SX, PIEZOMETRI P14 – ASX

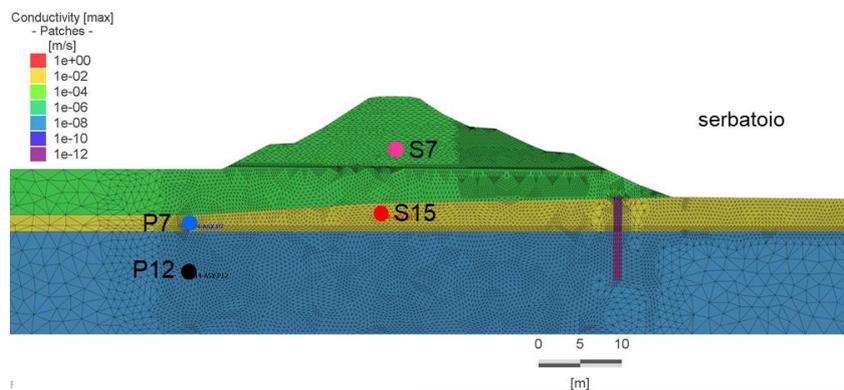
La sezione ST4SX come è riportato nella Figura 1 e nella Figura 2 è situata in sinistra idraulica. La sezione si trova nella porzione di arginatura principale in prossimità del suo innesto con il terrazzo fluviale. La sezione è quindi caratterizzata da un elevato dislivello tra la sommità arginale e il piano campagna esterno alla cassa. I livelli di falda osservati dagli strumenti installati risentono sicuramente delle dinamiche del fiume. Come si nota in Figura 12 le osservazioni registrate dai piezometri, la cui posizione è riportata in Figura 13, presentano alcune piccole anomalie. In particolare il piezometro P7 nell'inverno 2021. Comunque è stato possibile definire un modello, la cui porzione in corrispondenza del corpo arginale è riportata in Figura 14, che ricostruisce in modo sufficientemente accurato i due eventi significativi del dicembre 2020 e del maggio 2021 come riportato in Figura 15 e in Figura 16. Tali risultati confermano la presenza del diaframma come da progetto. Tutti i piezometri sembrano risentire della variazione di carico nel serbatoio eccetto il piezometro S7 che non è sollecitato dagli eventi. Ciò ha reso difficile una calibrazione del valore della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale. Per tale motivo come già anticipato in precedenza il modello della sezione così definito è stato utilizzato per simulare le sollecitazioni della seconda e della terza prova di invaso previste dal programma degli invasi utilizzando due differenti valori di conducibilità idraulica. Nella Tabella 4 e nella Figura 17 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Nella Tabella 5 e nella Figura 18 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . I risultati variano notevolmente al variare della conducibilità idraulica e delle condizioni iniziali della falda senza grandi differenze tra le due prove di invaso. Per un valore iniziale della falda pari al livello osservato nel maggio 2021 all'inizio della prima prova di invaso, riportato nelle tabelle con l'asterisco, si può notare che con un valore della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per entrambe le prove di invaso non avviene l'emersione della falda a lato campagna dell'arginatura. Tale fenomeno si manifesta invece già con valori iniziali della quota di falda piuttosto esigui nel caso in cui della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



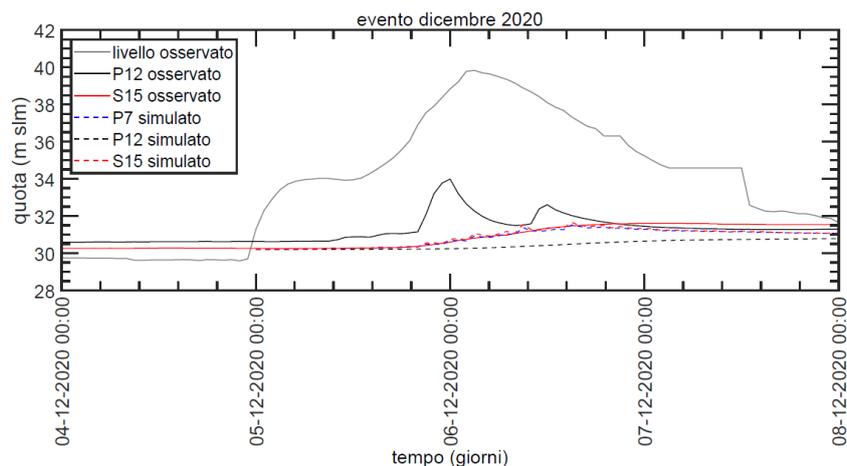
**Figura 12.** Andamento dei carichi osservati dai piezometri installati nella sezione ST4SX.



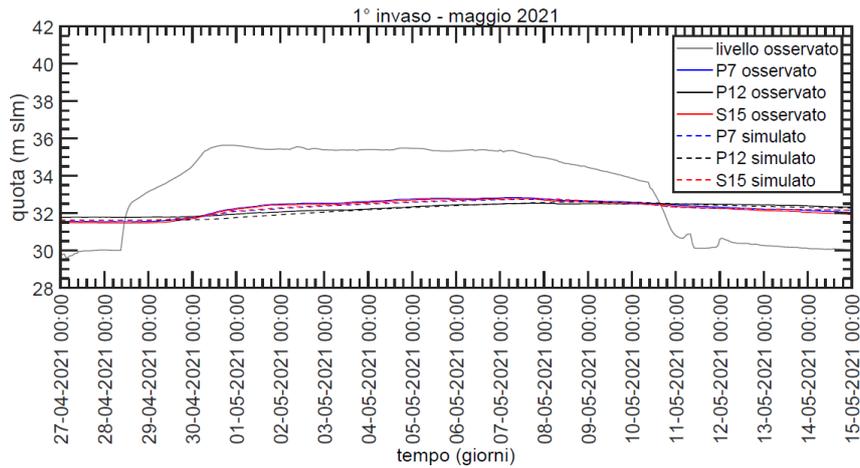
**Figura 13.** La stratigrafia ottenuta dall'analisi delle carote estratte durante l'installazione dei piezometri stessi. Nell'immagine è evidenziata anche la posizione delle celle piezometriche.



**Figura 14.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. I diversi valori di conducibilità idraulica mettono in evidenza come da progetto anche la presenza del diaframma di lunghezza pari a 10 m che è stato simulato imponendo una conducibilità pari a  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ . Nell'immagine è evidenziata la posizione delle celle piezometriche.



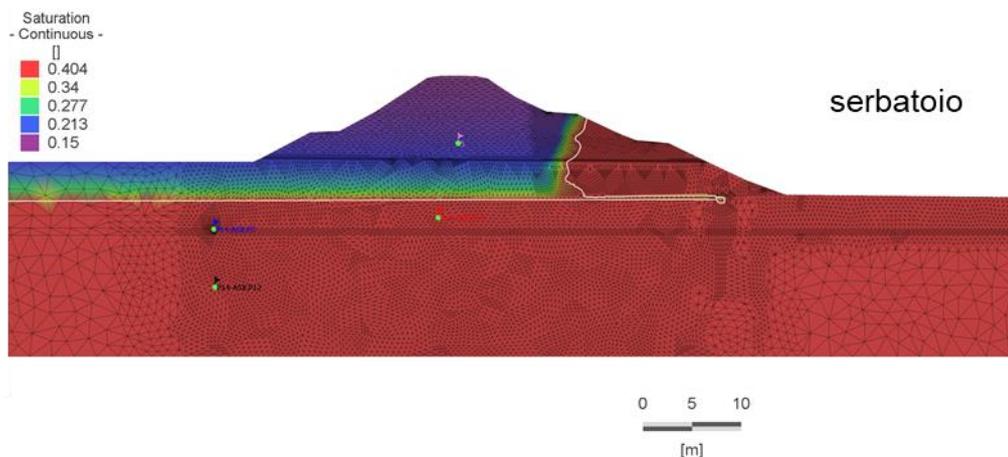
**Figura 15.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per l'evento di piena del dicembre 2020. Il piezometro S7 che non è sollecitato dall'evento, non è stato riportato in figura. I valori del piezometro P7 osservati presentano delle anomalie in quanto il carico si attesta in questo periodo a quote pari a 2 m slm. Il piezometro P12 presenta picchi anomali che sembrano legati alle precipitazioni.



**Figura 16.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per la prima prova di invaso del maggio 2021. Il piezometro S7 che non è sollecitato dall'evento, non è stato riportato in figura. Per questo evento non si presentano anomalie dei valori osservati. Si può notare inoltre una buona concordanza dei valori ottenuti dal modello con quelli osservati.

	quota iniziale della falda (m slm)
2° invaso	31.5 <sup>(*)</sup>
3° invaso	31.5 <sup>(*)</sup>

**Tabella 4.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .

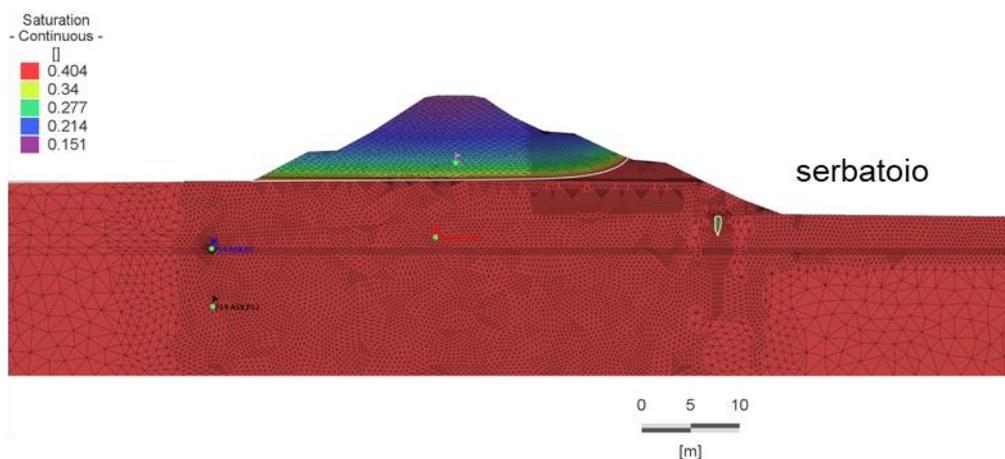


**Figura 17.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato

è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 31.5 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

	quota iniziale della falda (m slm)
2° invaso	30.0
3° invaso	30.0

**Tabella 5.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1 \text{ m}$ . Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .

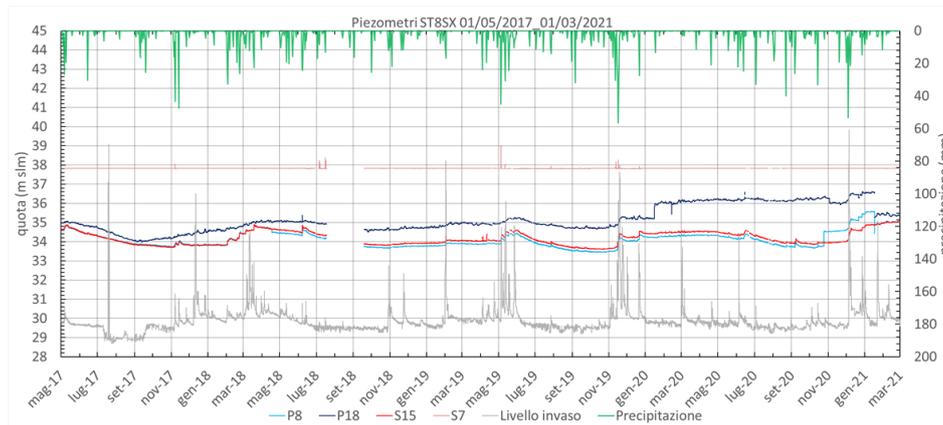


**Figura 18.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 30.0 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

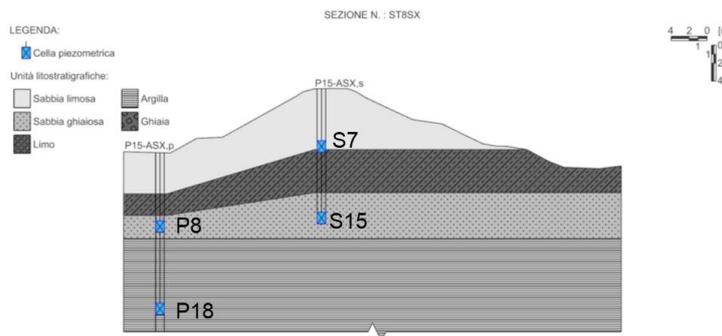
## SEZIONE ST8SX, PIEZOMETRI P15 – ASX

La sezione ST8SX come è riportato nella Figura 1 e nella Figura 2 è situata in sinistra idraulica. L'arginatura in questo tratto è posta in corrispondenza della scarpata del terrazzo fluviale. La sezione è quindi caratterizzata da un dislivello tra la sommità arginale e il piano campagna esterno alla cassa non particolarmente elevato. I livelli di falda osservati dagli strumenti installati si attestano ad una quota ben più elevata della quota del pelo libero a cui si attestano le portate di magra. Come si nota in Figura 19 le osservazioni registrate dai piezometri, la cui posizione è riportata in Figura 20, presentano alcune piccole anomalie. In particolare i piezometri P8 e P18. Nelle figure si può notare come il piezometro P18 sembri essere collegato ad un acquifero più profondo meno sensibile alle variazioni di carico nel serbatoio. Comunque è stato possibile definire un modello, la cui porzione in corrispondenza del corpo arginale è riportata in Figura 21, che ricostruisce in modo sufficientemente accurato i due eventi significativi del dicembre 2020 e del maggio 2021 come riportato in Figura 22 e in Figura 23. Tali risultati confermano la presenza del diaframma come da progetto. Tutti i piezometri sembrano risentire della variazione di carico nel serbatoio eccetto il piezometro S7 che non è sollecitato dagli eventi. Ciò ha reso difficile una calibrazione del valore della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale. Per tale motivo come già anticipato in precedenza il modello della sezione così definito è stato utilizzato per simulare le sollecitazioni della seconda e della terza prova di invaso previste dal programma degli invasi utilizzando due differenti valori di conducibilità idraulica. Nella Tabella 6

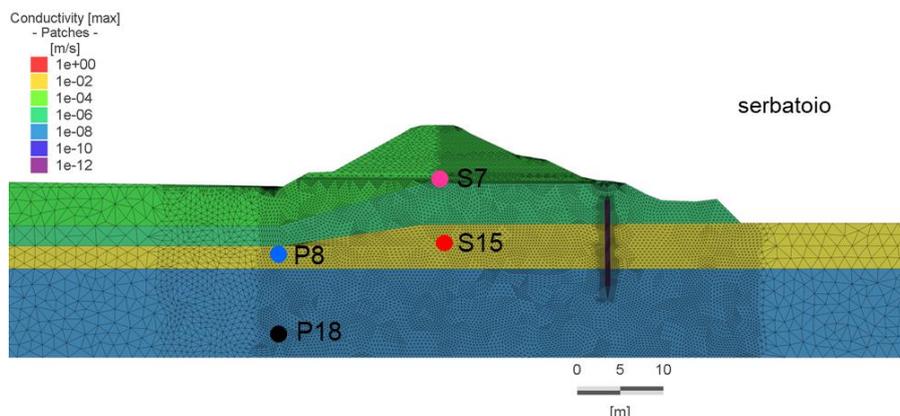
e nella Figura 24 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Nella Tabella 7 e nella Figura 25 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . In questa sezione i risultati non variano notevolmente al variare della conducibilità idraulica del corpo arginale e delle condizioni iniziali della falda per entrambe le due prove di invaso. Per un valore iniziale della falda pari al livello osservato nel maggio 2021 all'inizio della prima prova di invaso, valore piuttosto elevato tra quelli osservati per questa sezione e riportato nelle tabelle con l'asterisco, si può notare che con entrambi i valori della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale e per entrambe le prove di invaso non avviene l'emersione della falda a lato campagna dell'arginatura.



**Figura 19.** Andamento dei carichi osservati dai piezometri installati nella sezione ST8SX.

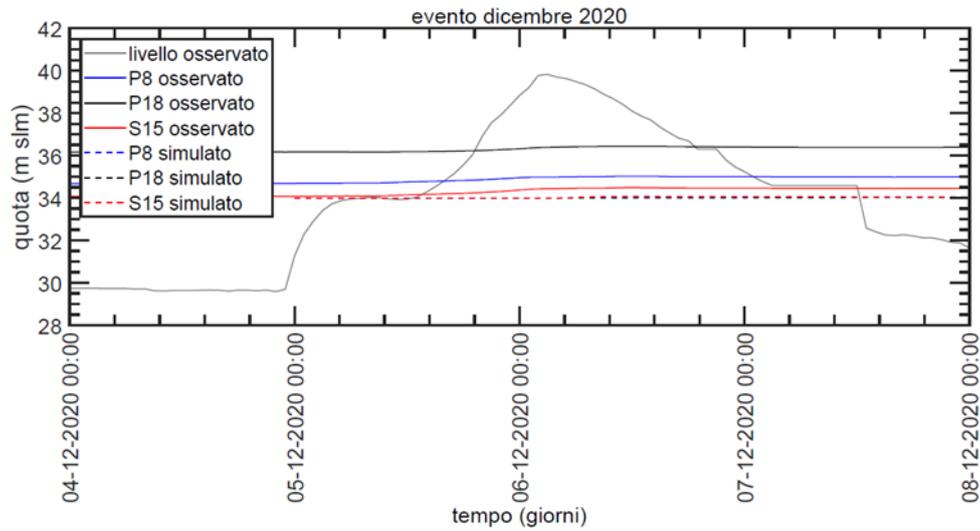


**Figura 20.** La stratigrafia ottenuta dall'analisi delle carote estratte durante l'installazione dei piezometri stessi. Nell'immagine è evidenziata anche la posizione delle celle piezometriche.

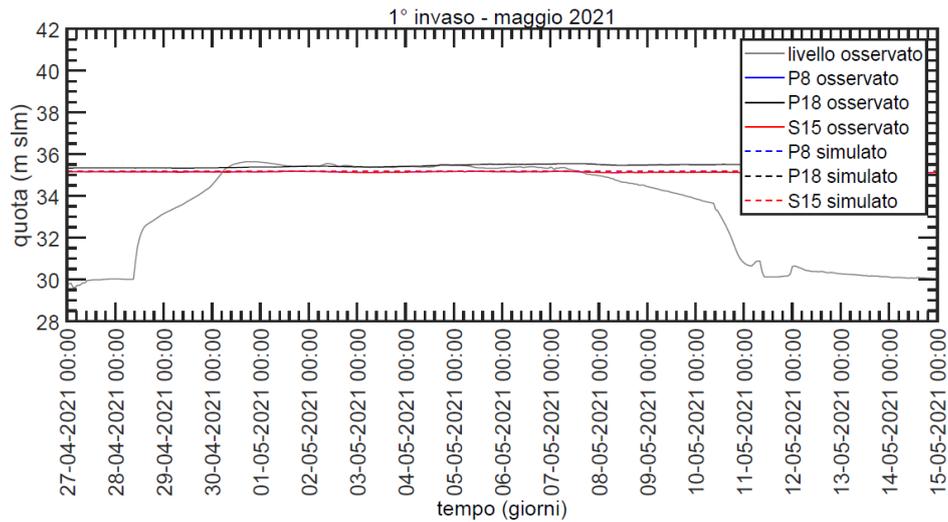


**Figura 21.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. I diversi valori di conducibilità idraulica mettono in evidenza come da progetto anche la presenza del diaframma, di lunghezza

pari a 10 m, che è stato simulato imponendo una conducibilità pari a  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ . Nell'immagine è evidenziata la posizione delle celle piezometriche.



**Figura 22.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per l'evento di piena del dicembre 2020. Il piezometro S7 che non è sollecitato dall'evento, non è stato riportato in figura.

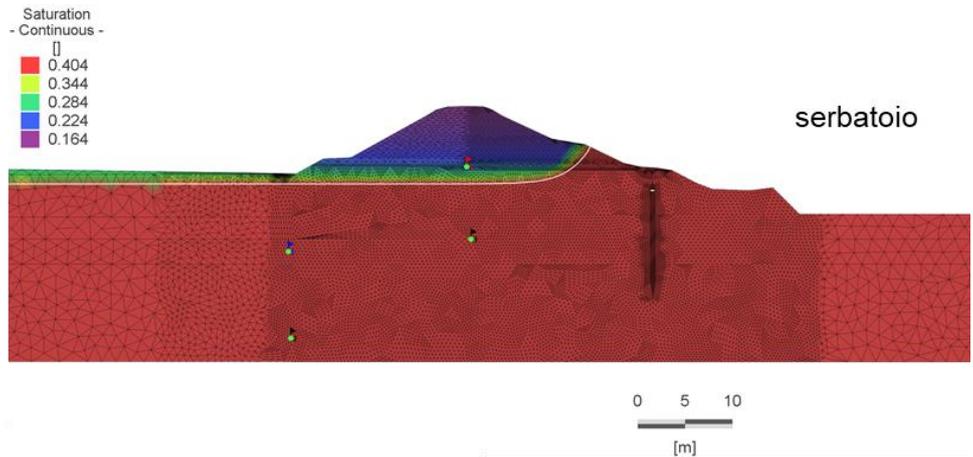


**Figura 23.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per la prima prova di invaso del maggio 2021. Il piezometro S7 che non è sollecitato dall'evento, non è stato riportato in figura. Per questo evento non si presentano anomalie dei valori osservati. Si può notare inoltre una buona concordanza dei valori ottenuti dal modello con quelli osservati.

	quota iniziale della falda (m slm)		
2° invaso	33.5	34.5	35.5 <sup>(*)</sup>
3° invaso	33.5	34.5	35.5 <sup>(*)</sup>

**Tabella 6.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna

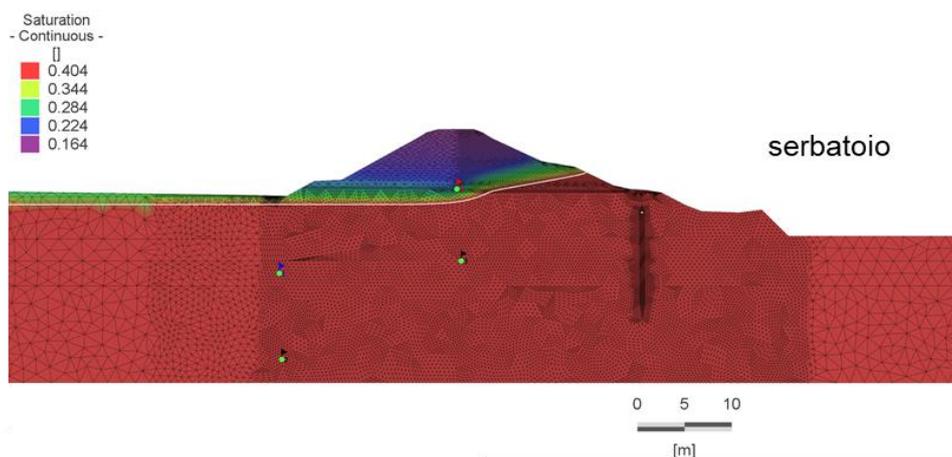
al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.



**Figura 24.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 35.5 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

	quota iniziale della falda (m slm)		
2° invaso	33.5	34.5	35.5 <sup>(*)</sup>
3° invaso	33.5	34.5	35.5 <sup>(*)</sup>

**Tabella 7.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .

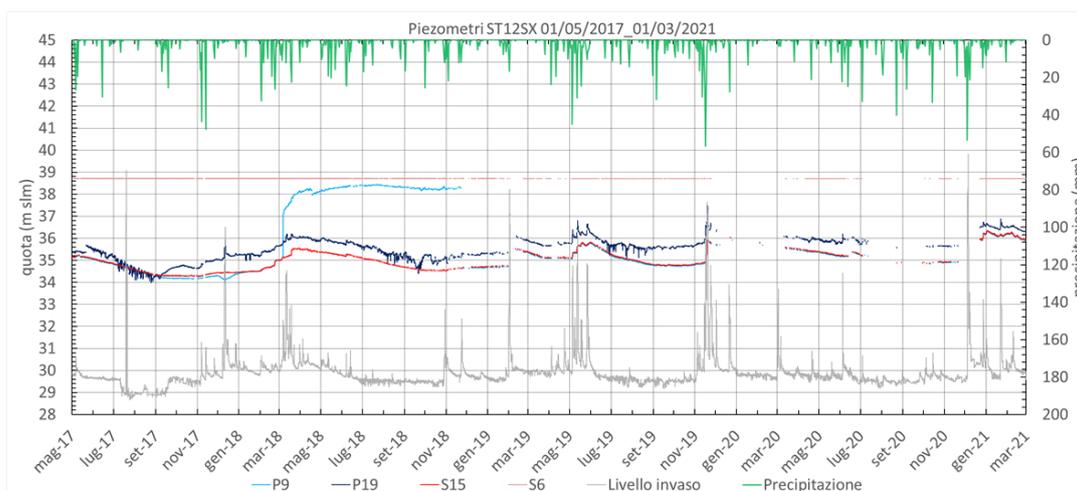


**Figura 25.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato

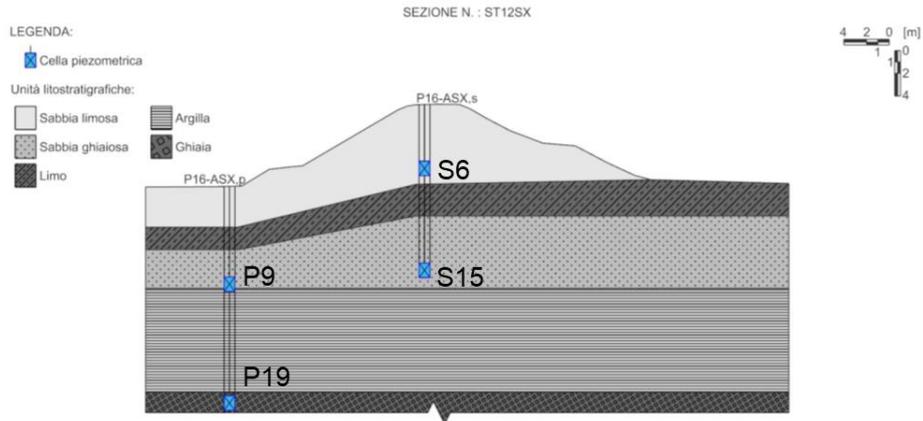
è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 35.5 m e un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

## SEZIONE ST12SX, PIEZOMETRI P16 – ASX

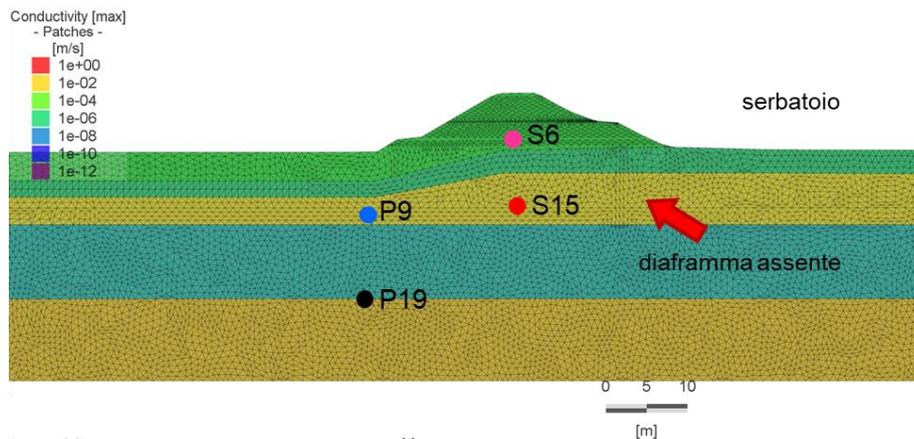
La sezione ST12SX come è riportato nella Figura 1 e nella Figura 2 è situata in sinistra idraulica. La sezione che si trova nella porzione di arginatura principale sul lato occidentale della cassa in un punto in cui il corpo arginale si allontana dalla scarpata dal terrazzo fluviale, è comunque caratterizzata da un dislivello tra la sommità arginale e il piano campagna esterno alla cassa non particolarmente elevato. I livelli di falda osservati dagli strumenti installati si attestano ad una quota ben più elevata della quota del pelo libero a cui si attestano le portate di magra. Come si nota in Figura 26 le osservazioni registrate dai piezometri, la cui posizione è riportata in Figura 27, presentano alcune anomalie e considerevoli lacune in particolare nel periodo della piena del dicembre 2020. Nelle figure si può notare come il piezometro P19 sembri essere collegato ad un acquifero più profondo che risente in modo differente delle variazioni di carico nel serbatoio. Comunque è stato possibile definire un modello, la cui porzione in corrispondenza del corpo arginale è riportata in Figura 28, che ricostruisce in modo sufficientemente accurato i due eventi significativi del dicembre 2020 e del maggio 2021 come riportato in Figura 29 e in Figura 30. Tali risultati confermano l'assenza del diaframma come riportato nell'allegato 2 del progetto MO 668. Tutti i piezometri sembrano risentire della variazione di carico nel serbatoio eccetto il piezometro S6 che non è sollecitato dagli eventi. Ciò ha reso difficile una calibrazione del valore della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale. Per tale motivo, come già anticipato in precedenza, il modello della sezione così definito è stato utilizzato per simulare le sollecitazioni della seconda e della terza prova di invaso previste dal programma degli invasi utilizzando due differenti valori di conducibilità idraulica. Nella Tabella 8 e nella Figura 31 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale del corpo arginale. Nella Tabella 9 e nella Figura 32 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . In questa sezione i risultati non variano notevolmente al variare della conducibilità idraulica e delle condizioni iniziali della falda per entrambe le due prove di invaso. Già per un valore iniziale della falda tra i minimi rilevati nel periodo di osservazione ed inferiore al livello osservato nel maggio 2021 all'inizio della prima prova di invaso, si può notare che con entrambi i valori della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale e per entrambe le prove di invaso avviene l'emersione della falda a lato campagna dell'arginatura.



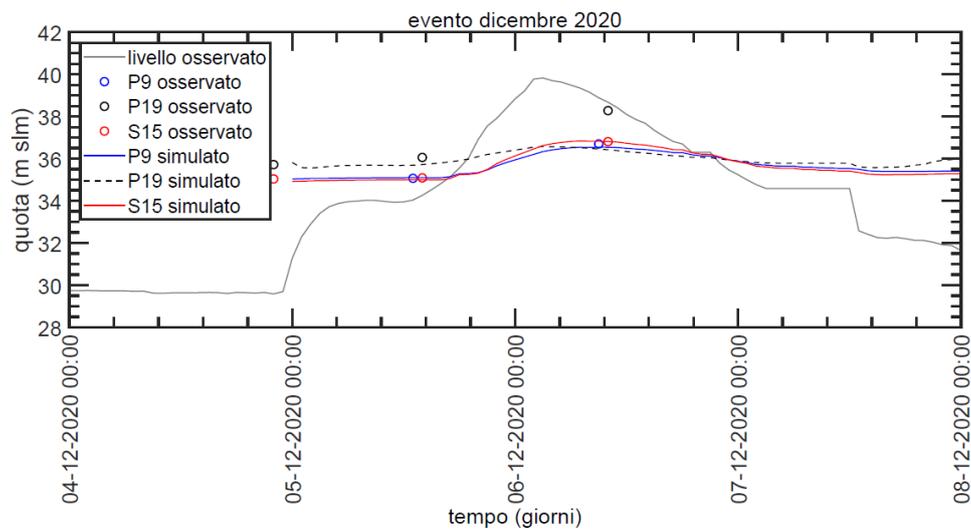
**Figura 26.** Andamento dei carichi osservati dai piezometri installati nella sezione ST12SX.



**Figura 27.** La stratigrafia ottenuta dall’analisi delle carote estratte durante l’installazione dei piezometri stessi. Nell’immagine è evidenziata anche la posizione delle celle piezometriche.

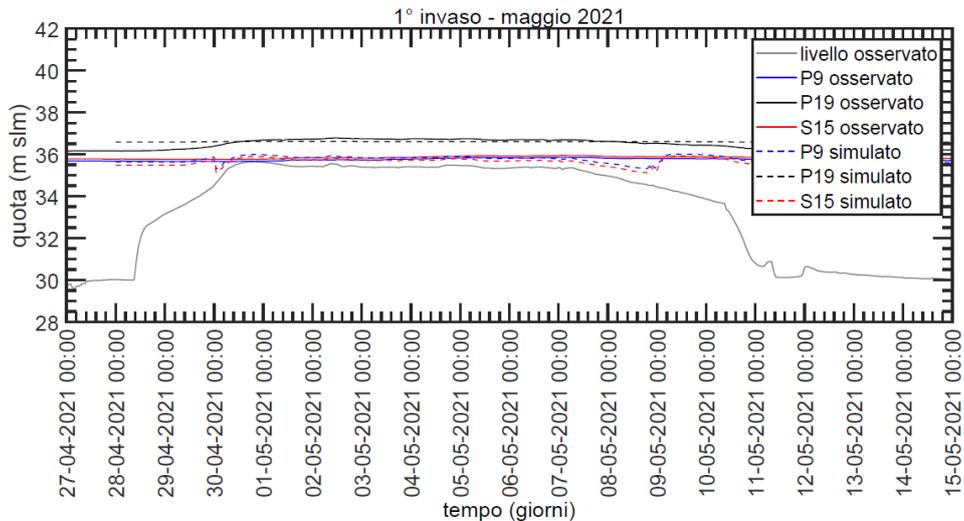


**Figura 28.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell’arginatura. I diversi valori di conducibilità idraulica mettono in evidenza anche l’assenza del diaframma riportato nell’allegato 2 del progetto MO 668. Nell’immagine è evidenziata anche la posizione delle celle piezometriche.



**Figura 29.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per l’evento di piena del dicembre 2020. Il piezometro S6 che non è sollecitato dall’evento, non è stato riportato

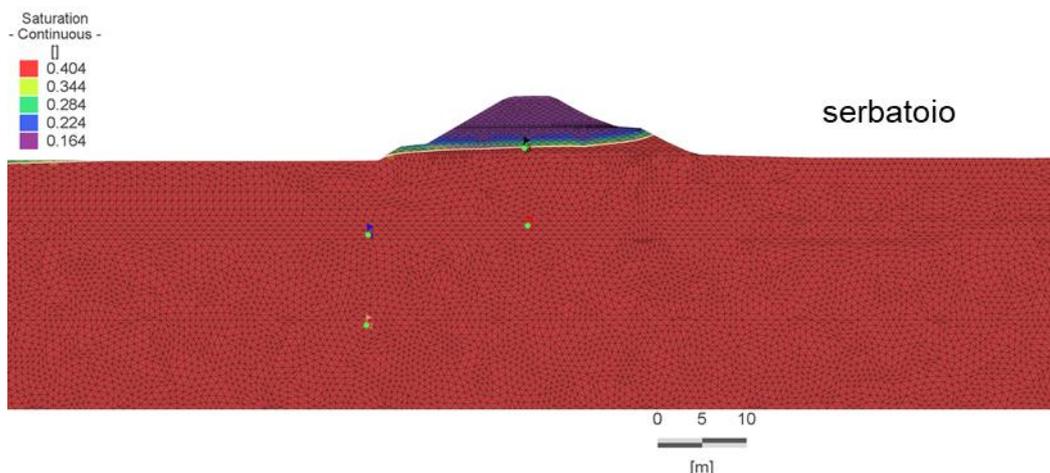
in figura. Nonostante i pochi dati osservati a disposizione si può notare una buona concordanza dei valori ottenuti dal modello con quelli osservati.



**Figura 30.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per la prima prova di invaso del maggio 2021. Il piezometro S6 che non è sollecitato dall'evento, non è stato riportato in figura. Per questo evento non si presentano anomalie dei valori osservati. Si può notare inoltre una buona concordanza dei valori ottenuti dal modello con quelli osservati.

	quota iniziale della falda (m s.l.m)
2° invaso	34.5
3° invaso	34.5

**Tabella 8.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .

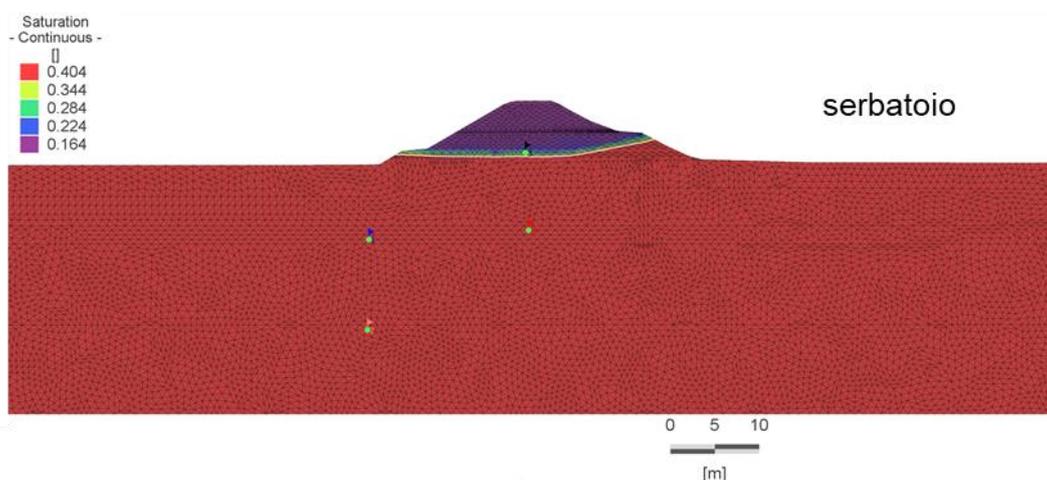


**Figura 31.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato

è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 34.5 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

	quota iniziale della falda (m slm)
2° invaso	34.5
3° invaso	34.5

**Tabella 9.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la quota massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1 \text{ m}$ . Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .

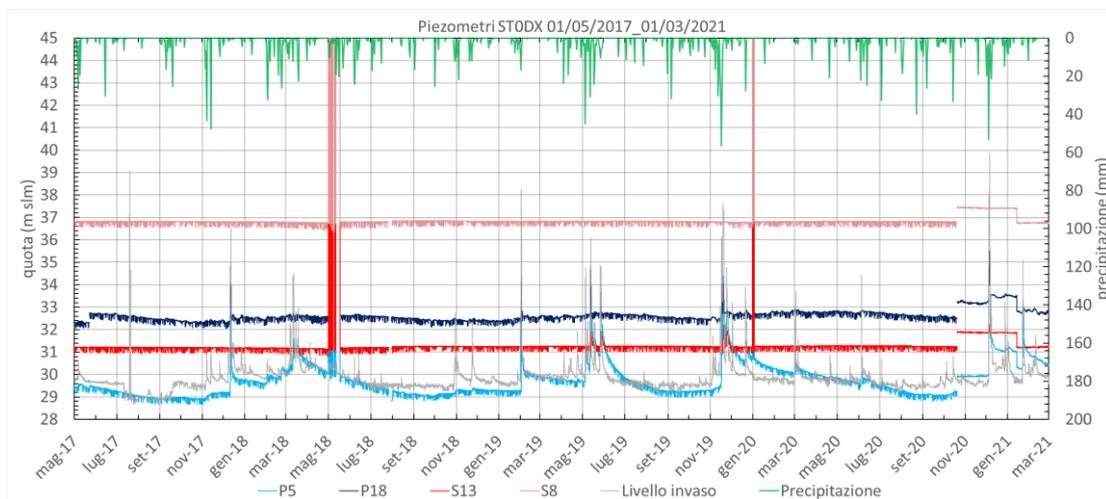


**Figura 32.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 34.5 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

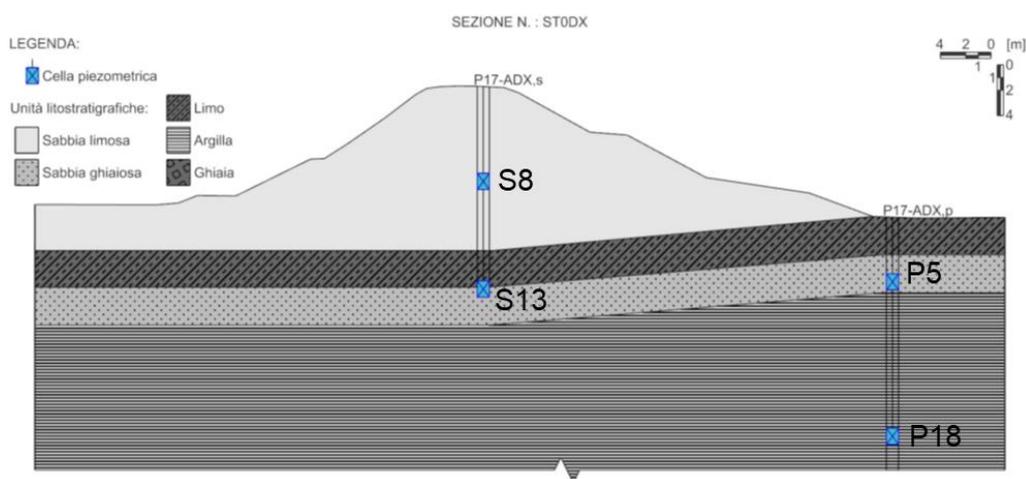
## SEZIONE ST0DX, PIEZOMETRI P17 – ADX

La sezione ST0DX come è riportato nella Figura 1 e nella Figura 2 è situata in destra idraulica in prossimità del manufatto regolatore. La sezione si trova nella porzione di arginatura principale che, perpendicolare all'alveo fluviale, attraversa la piana alluvionale. La sezione è quindi caratterizzata da un elevato dislivello tra la sommità arginale e il piano campagna esterno alla cassa. I livelli di falda osservati dagli strumenti installati si attestano ad una quota comparabile alla quota del pelo libero a cui si attestano le portate di magra. Come si nota in Figura 33, le osservazioni registrate dai piezometri, la cui posizione è riportata in Figura 34, presentano alcune anomalie in particolare nel autunno 2020. Nonostante alcune anomalie è stato possibile definire un modello, la cui porzione in corrispondenza del corpo arginale è riportata in Figura 35, che ricostruisce in modo sufficientemente accurato l'evento del dicembre 2020. Durante tale evento come solitamente accade in tutti gli eventi di piena, nel tratto di alveo immediatamente a valle del manufatto regolatore si instaurano fenomeni di rigurgito con presenza di battenti elevati. Questa sezione risente di tali fenomeni come riportato in Figura 36. La sezione invece non è stata sollecitata dall'invaso del maggio 2021

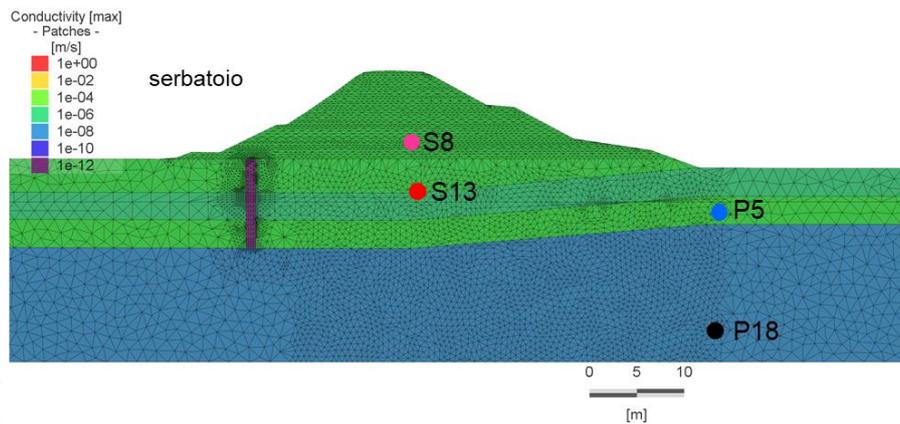
perché il livello massimo a cui si è attestato l'invaso è minore del piede dell'argine lato cassa (Figura 37). Tali risultati confermano la presenza del diaframma come da progetto. Come già anticipato in precedenza il modello della sezione così definito è stato utilizzato per simulare le sollecitazioni della seconda e della terza prova di invaso previste dal programma degli invasi utilizzando due differenti valori di conducibilità idraulica. Nella Tabella 10 e nella Figura 38 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Nella Tabella 11 e nella Figura 39 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Come si può notare i risultati variano in particolare al variare della conducibilità idraulica ma non delle condizioni iniziali della falda e della prova di invaso. Per un valore iniziale della falda considerati, compreso quello riportato nelle tabelle con l'asterisco che rappresenta il livello della falda all'inizio della prima prova di invaso, si può notare che, con un valore della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ , per entrambe le prove di invaso non avviene l'emersione della falda a lato campagna dell'arginatura. Tale fenomeno si manifesta invece già con valori iniziali della quota di falda piuttosto esigui nel caso in cui si consideri una conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



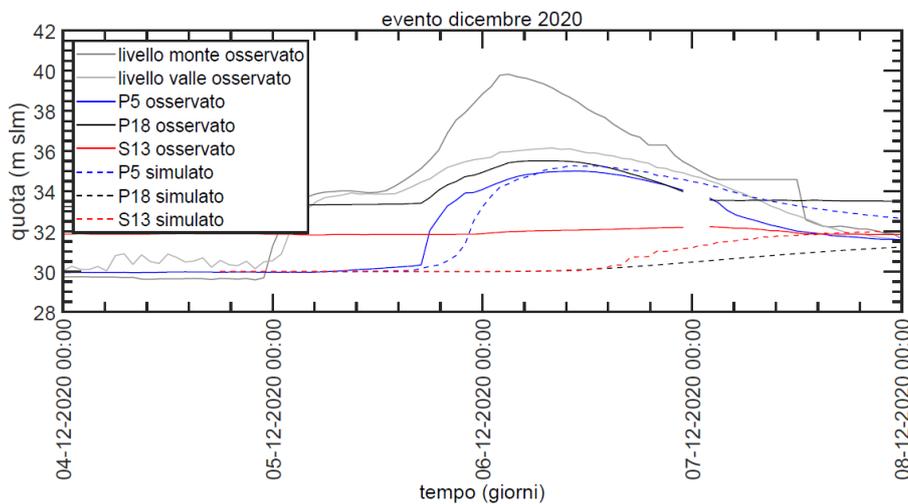
**Figura 33.** Andamento dei carichi osservati dai piezometri installati nella sezione ST0DX.



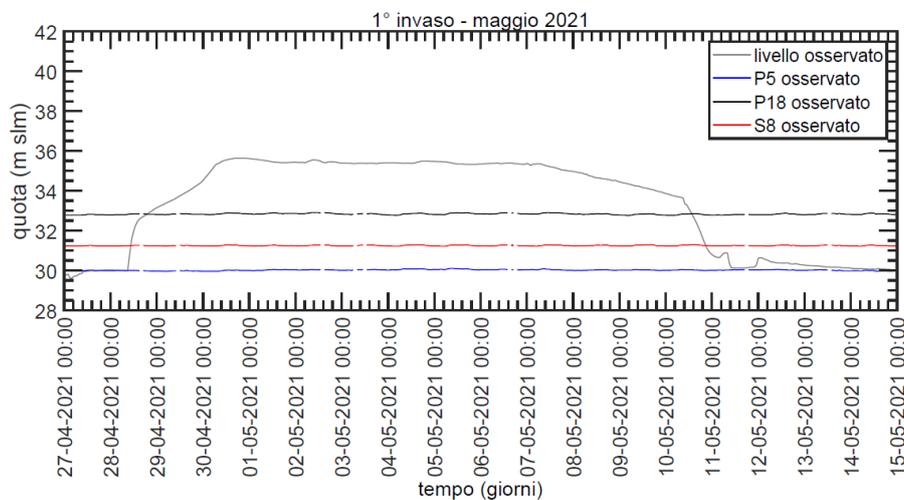
**Figura 34.** La stratigrafia ottenuta dall'analisi delle carote estratte durante l'installazione dei piezometri stessi. Nell'immagine è evidenziata anche la posizione delle celle piezometriche.



**Figura 35.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. I diversi valori di conducibilità idraulica mettono in evidenza come da progetto anche la presenza del diaframma, di lunghezza pari a 10 m, che è stato simulato imponendo una conducibilità pari a  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ . Nell'immagine è evidenziata la posizione delle celle piezometriche.



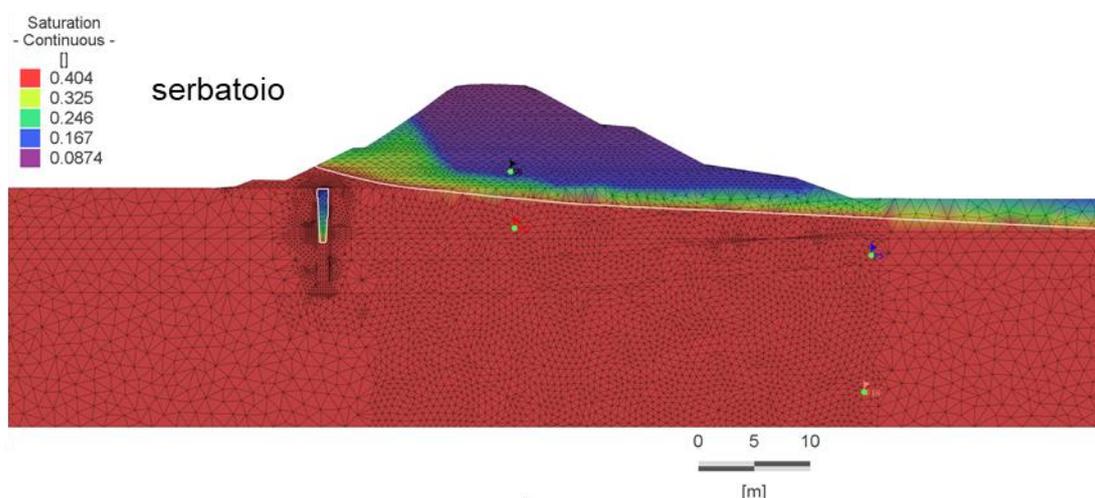
**Figura 36.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per l'evento di piena del dicembre 2020. Il piezometro S8 che non è sollecitato dall'evento, non è stato riportato in figura. La sezione risente dell'aumento del livello a valle del manufatto dovuto ai fenomeni di rigurgito.



**Figura 37.** La sezione non è stata sollecitata dall'invaso del maggio 2021 perché il livello massimo a cui si è attestato l'invaso è minore del piede dell'argine lato cassa.

	quota iniziale della falda (m slm)		
2° invaso	29.0	30.0 <sup>(*)</sup>	31.0
3° invaso	29.0	30.0 <sup>(*)</sup>	31.0

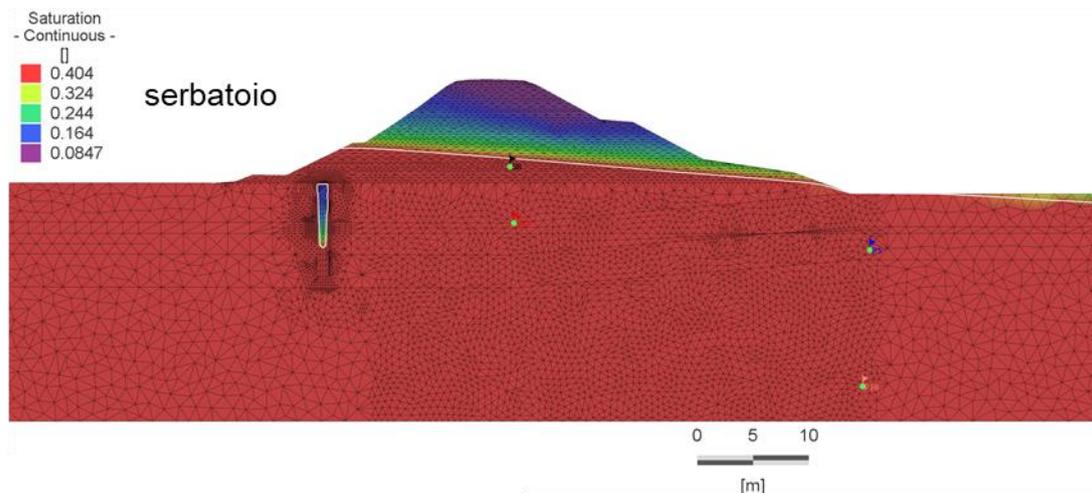
**Tabella 10.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenziano i casi in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 38.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 30.0 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

	quota iniziale della falda (m slm)	
2° invaso	29.0	30.0 <sup>(*)</sup>
3° invaso	29.0	30.0 <sup>(*)</sup>

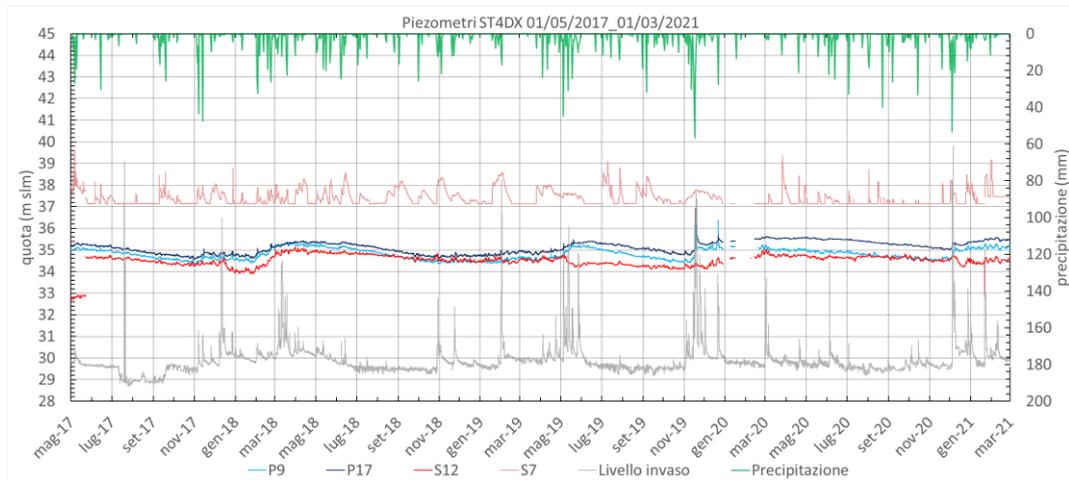
**Tabella 11.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenziano i casi in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



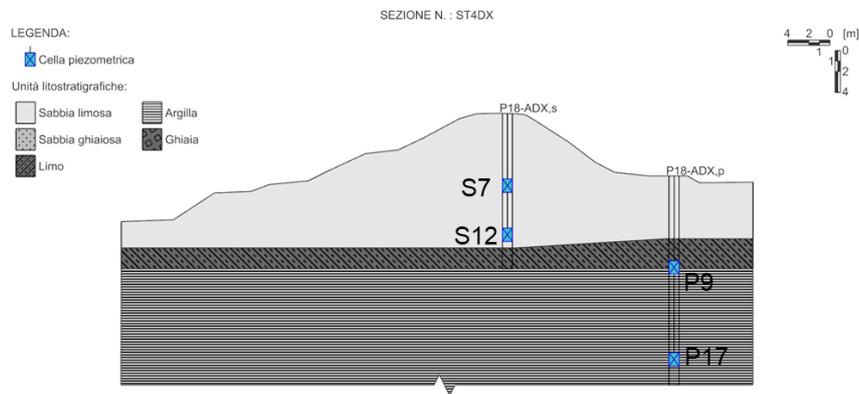
**Figura 39.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 30.0 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

## SEZIONE ST4DX, PIEZOMETRI P18 – ADX

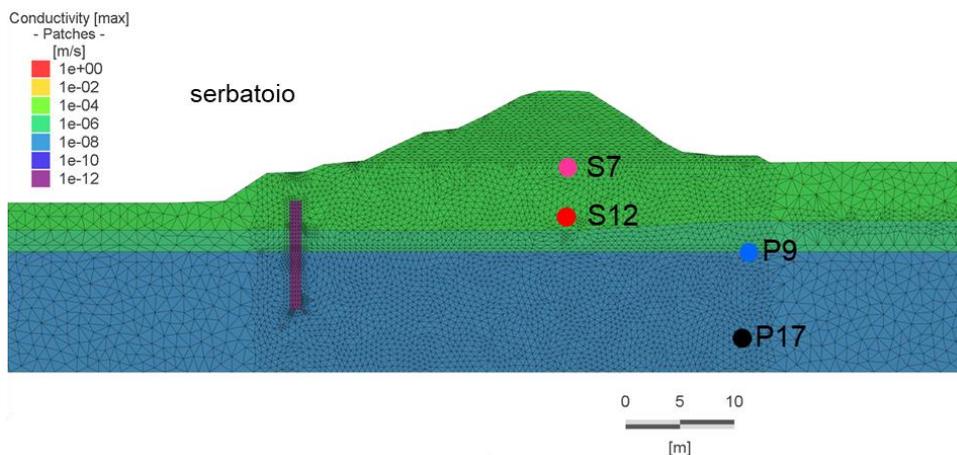
La sezione ST4DX come è riportato nella Figura 1 e nella Figura 2 è situata in destra idraulica in quella parte dell'arginatura principale che racchiude la cassa sussidiaria. L'arginatura in questo tratto è posta in corrispondenza della scarpata del terrazzo fluviale. La sezione è quindi caratterizzata da un dislivello tra la sommità arginale e il piano campagna esterno alla cassa non particolarmente elevato. I livelli di falda osservati dagli strumenti installati si attestano ad una quota ben più elevata della quota del pelo libero a cui si attestano le portate di magra. Come si nota in Figura 40, le osservazioni registrate dai piezometri, la cui posizione è riportata in Figura 41, presentano alcune anomalie, in particolare picchi anomali che sembrano legati alle precipitazioni. Questa sezione non è mai stata sollecitata dalle variazioni di livello nel serbatoio, pertanto è stato definito un modello, la cui porzione in corrispondenza del corpo arginale è riportata in Figura 42, assegnando le conducibilità idrauliche degli strati in analogia con le altre sezioni calibrate e ipotizzando i valori della conducibilità idraulica a parità di materiale analoghi a quelli calibrati nelle altre sezioni. Nella Figura 43 e nella Figura 44 sono riportati solo i carichi osservati dai piezometri. Il modello della sezione così definito è stato utilizzato per simulare le sollecitazioni della seconda e della terza prova di invaso previste dal programma degli invasi utilizzando due differenti valori di conducibilità idraulica. Nella Tabella 12 e nella Figura 45 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Nella Tabella 13 e nella Figura 46 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . I risultati variano in particolare al variare della conducibilità idraulica del corpo arginale ma non delle condizioni iniziali della falda e della prova di invaso. Per i valori iniziali del livello di falda considerati, compreso quello riportato nelle tabelle con l'asterisco che rappresenta il livello della falda all'inizio della prima prova di invaso, si può notare che con un valore della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per entrambe le prove di invaso non dovrebbe avvenire l'emersione della falda a lato campagna dell'arginatura. Tale fenomeno si manifesterebbe invece già con valori iniziali della quota di falda piuttosto esigui nel caso in cui la conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale sia pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



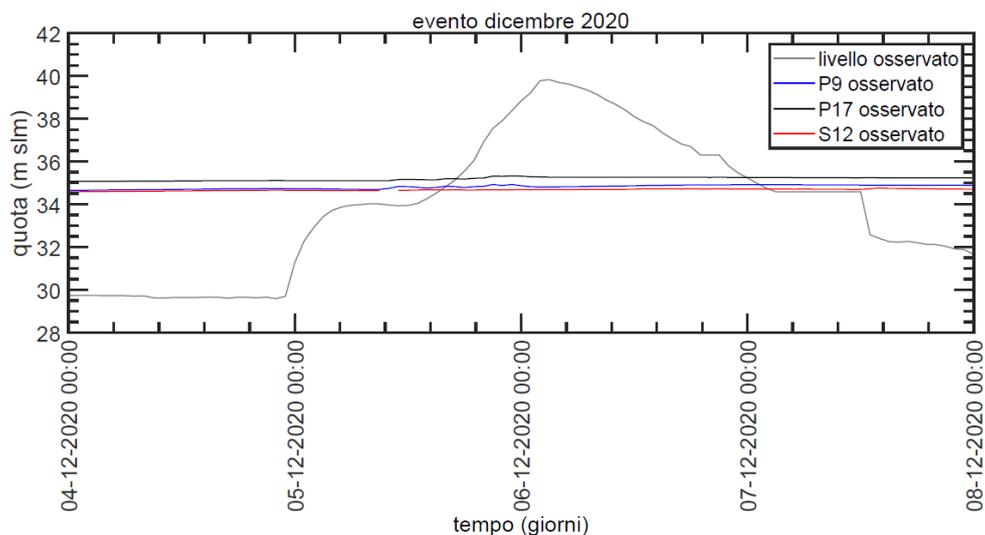
**Figura 40.** Andamento dei carichi osservati dai piezometri installati nella sezione ST4DX. Sono evidenti anomalie del piezometro S7.



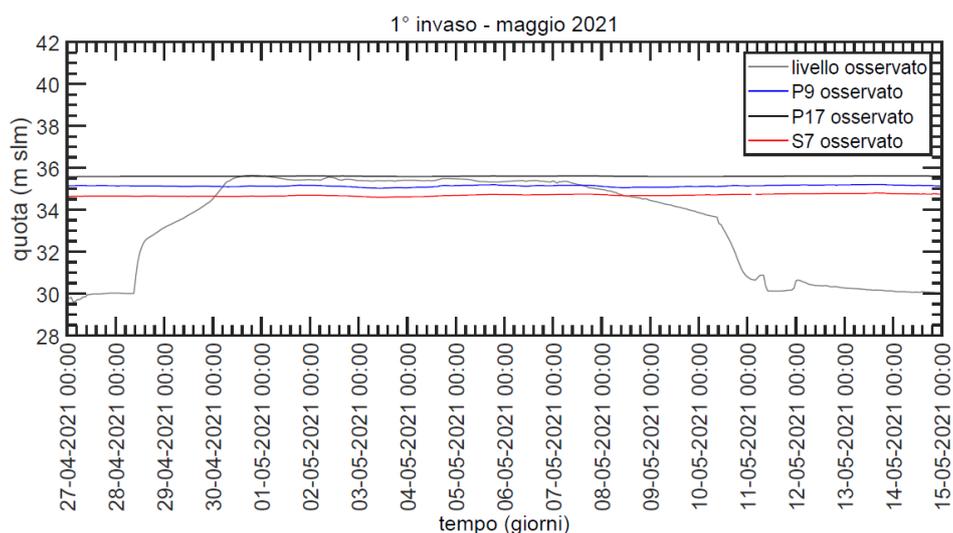
**Figura 41.** La stratigrafia ottenuta dall'analisi delle carote estratte durante l'installazione dei piezometri stessi. Nell'immagine è evidenziata anche la posizione delle celle piezometriche.



**Figura 42.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. I diversi valori di conducibilità idraulica mettono in evidenza come da progetto anche la presenza del diaframma, di lunghezza pari a 10 m, che è stato simulato imponendo una conducibilità pari a  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ . Nell'immagine è evidenziata la posizione delle celle piezometriche.



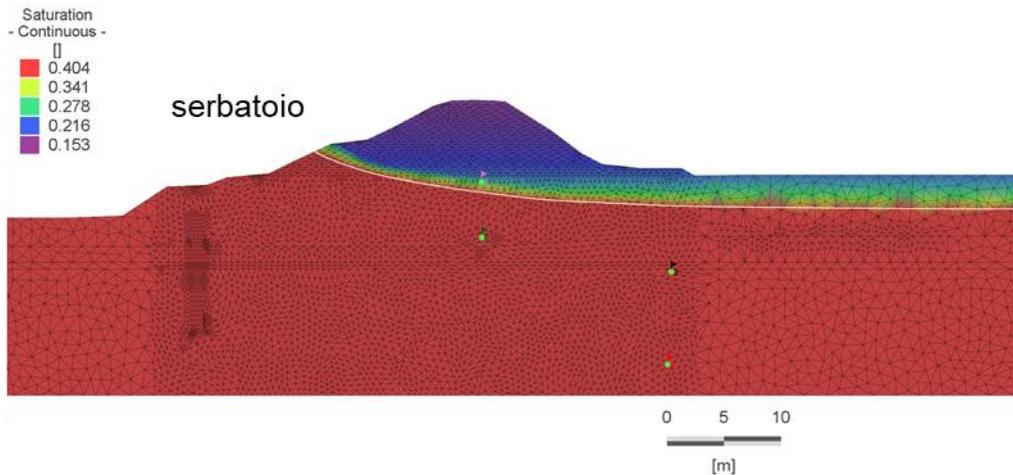
**Figura 43.** I valori del carico osservati durante l’evento di piena del dicembre 2020. Il piezometro S7 non è stato riportato in figura. I piezometri non evidenziano variazioni dei carichi legate alle dinamiche che avvengono nella sola cassa principale.



**Figura 44.** I valori del carico osservati durante la prima prova di invaso nel maggio 2021. Il piezometro S7 non è stato riportato in figura. I piezometri non evidenziano variazioni dei carichi legate alle dinamiche che avvengono nella sola cassa principale.

	quota iniziale della falda (m slm)	
2° invaso	34.0	35.0 <sup>(*)</sup>
3° invaso	34.0	35.0 <sup>(*)</sup>

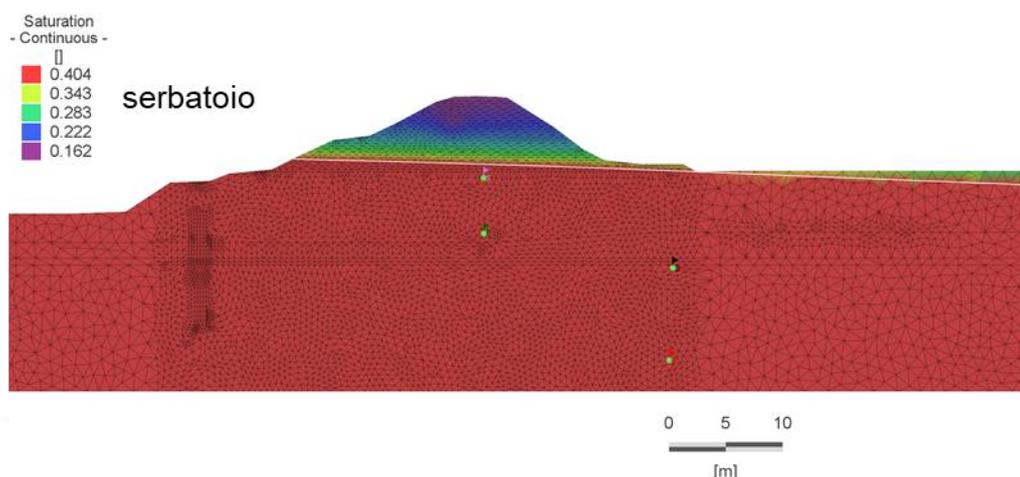
**Tabella 12.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenziano i casi in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 45.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 35.0 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

	quota iniziale della falda (m slm)	
2° invaso	34.0	35.0 <sup>(*)</sup>
3° invaso	34.0	35.0 <sup>(*)</sup>

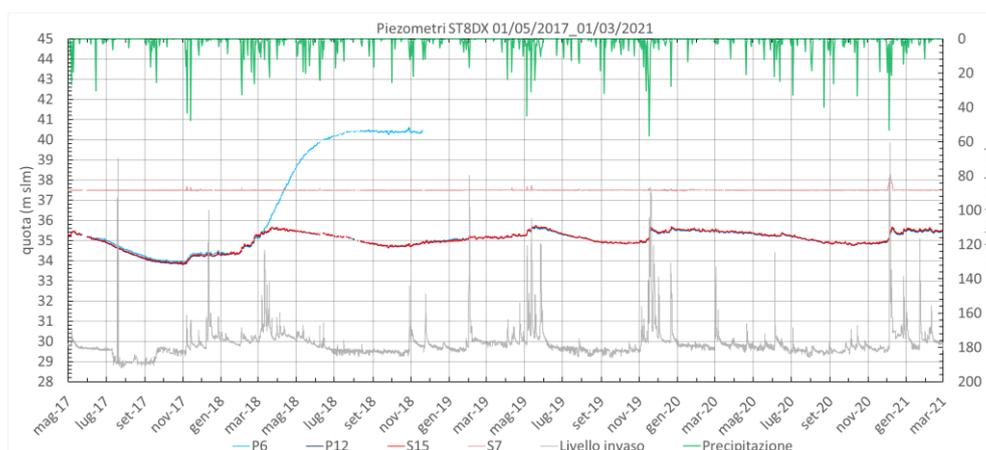
**Tabella 13.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenziano i casi in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1 \text{ m}$ . Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



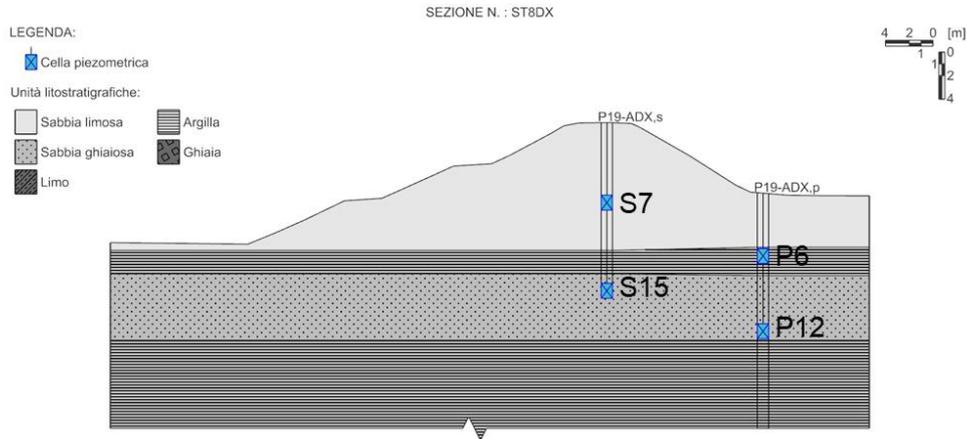
**Figura 46.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 35.0 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

## SEZIONE ST8DX, PIEZOMETRI P19 – ADX

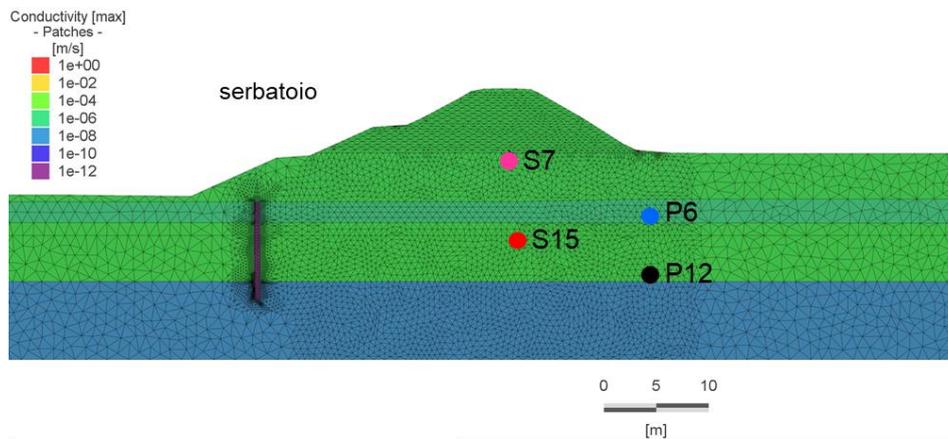
La sezione ST8DX come è riportato nella Figura 1 e nella Figura 2 è situata in destra idraulica in quella parte dell'arginatura principale che racchiude la cassa sussidiaria. L'arginatura in questo tratto è posta in corrispondenza della scarpata del terrazzo fluviale. La sezione è quindi caratterizzata da un dislivello tra la sommità arginale e il piano campagna esterno alla cassa non particolarmente elevato. I livelli di falda osservati dagli strumenti installati si attestano ad una quota ben più elevata della quota del pelo libero a cui si attestano le portate di magra. Come si nota in Figura 47, le osservazioni registrate dai piezometri, la cui posizione è riportata in Figura 48, presentano alcune anomalie. Questa sezione non è mai stata sollecitata dai livelli nel serbatoio, pertanto è stato definito un modello, la cui porzione in corrispondenza del corpo arginale è riportata in Figura 49, assegnando le conducibilità idrauliche degli strati in analogia con le altre sezioni calibrate e ipotizzando i valori della conducibilità idraulica a parità di materiale analoghi a quelli calibrati nelle altre sezioni. Nella Figura 50 e nella Figura 51 sono riportati solo i carichi osservati dai piezometri. Il modello della sezione così definito è stato utilizzato per simulare le sollecitazioni della seconda e della terza prova di invaso previste dal programma degli invasi utilizzando due differenti valori di conducibilità idraulica. Nella Tabella 14 e nella Figura 52 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Nella Tabella 15 e nella Figura 53 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . I risultati variano in particolare al variare della conducibilità idraulica del corpo arginale ma non delle condizioni iniziali della falda e della prova di invaso. Per i valori iniziali del livello di falda considerati, compreso quello riportato nelle tabelle con l'asterisco, che rappresenta il livello della falda all'inizio della prima prova di invaso, si può notare che, con un valore della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ , per entrambe le prove di invaso non dovrebbe avvenire l'emersione della falda a lato campagna dell'arginatura. Tale fenomeno si manifesterebbe invece già con valori iniziali della quota di falda piuttosto esigui nel caso in cui la conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale sia pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



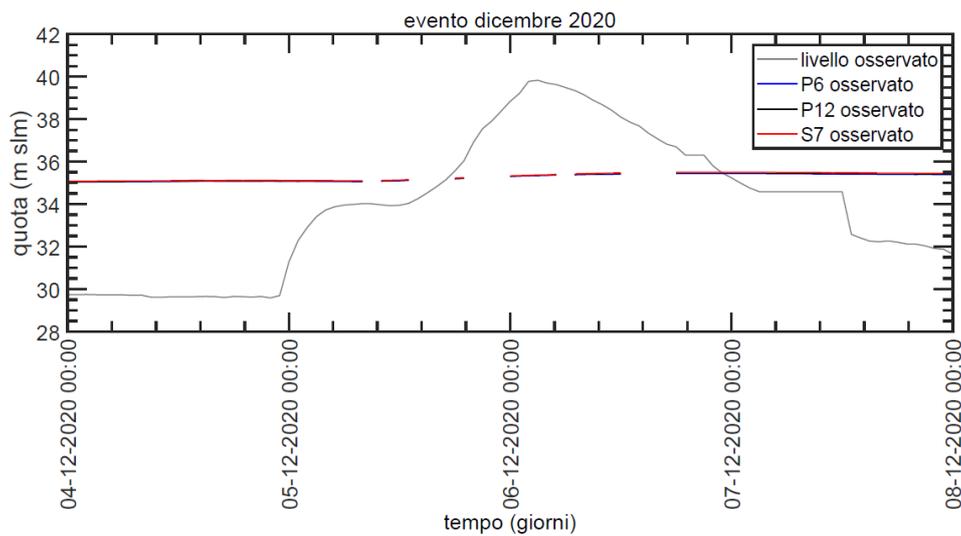
**Figura 47.** Andamento dei carichi osservati dai piezometri installati nella sezione ST8DX.



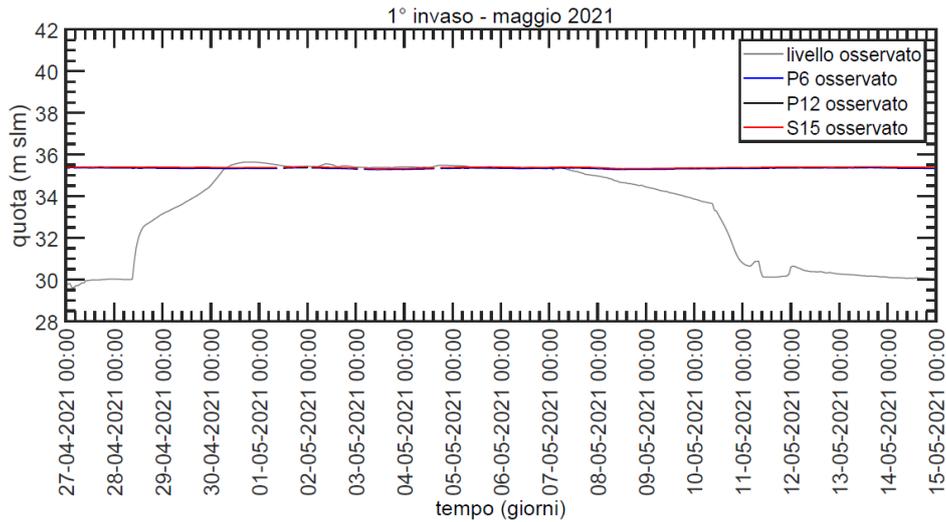
**Figura 48.** La stratigrafia ottenuta dall'analisi delle carote estratte durante l'installazione dei piezometri stessi. Nell'immagine è evidenziata anche la posizione delle celle piezometriche.



**Figura 49.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. I diversi valori di conducibilità idraulica mettono in evidenza come da progetto anche la presenza del diaframma, di lunghezza pari a 10 m, che è stato simulato imponendo una conducibilità pari a  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ . Nell'immagine è evidenziata la posizione delle celle piezometriche.



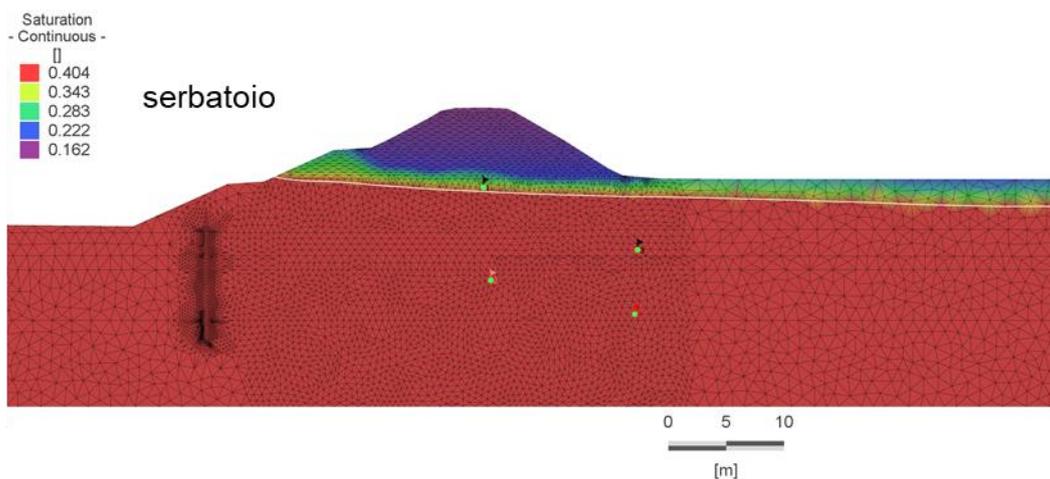
**Figura 50.** I valori del carico osservati durante l'evento di piena del dicembre 2020. Il piezometro S7 non è stato riportato in figura. I piezometri non evidenziano variazioni dei carichi legate alle dinamiche che avvengono nella sola cassa principale.



**Figura 51.** I valori del carico osservati durante la prima prova di invaso nel maggio 2021. Il piezometro S7 non è stato riportato in figura. I piezometri non evidenziano variazioni dei carichi legate alle dinamiche che avvengono nella sola cassa principale.

	quota iniziale della falda (m slm)	
2° invaso	34.0	35.0 <sup>(*)</sup>
3° invaso	34.0	35.0 <sup>(*)</sup>

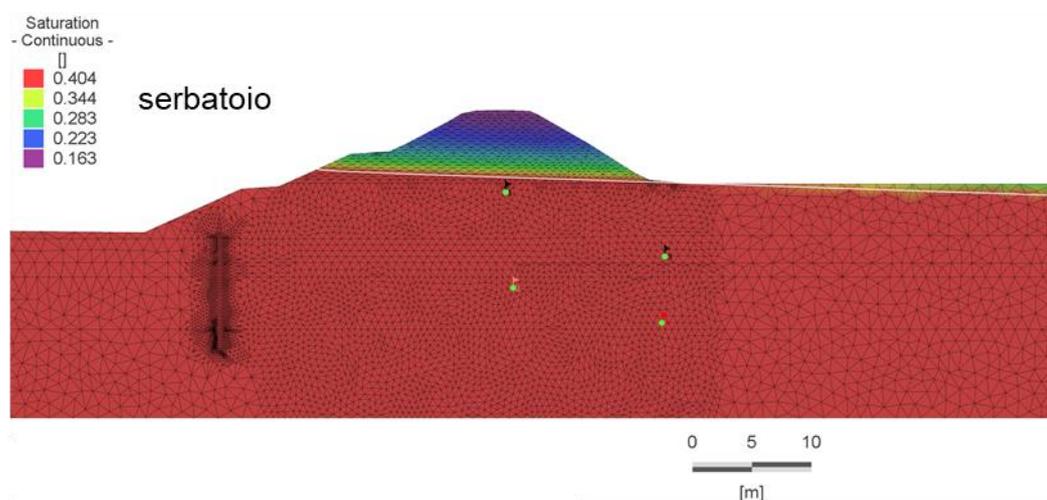
**Tabella 14.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenziano i casi in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 52.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 35.0 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

	quota iniziale della falda (m slm)	
2° invaso	34.0	35.0 <sup>(*)</sup>
3° invaso	34.0	35.0 <sup>(*)</sup>

**Tabella 15.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .

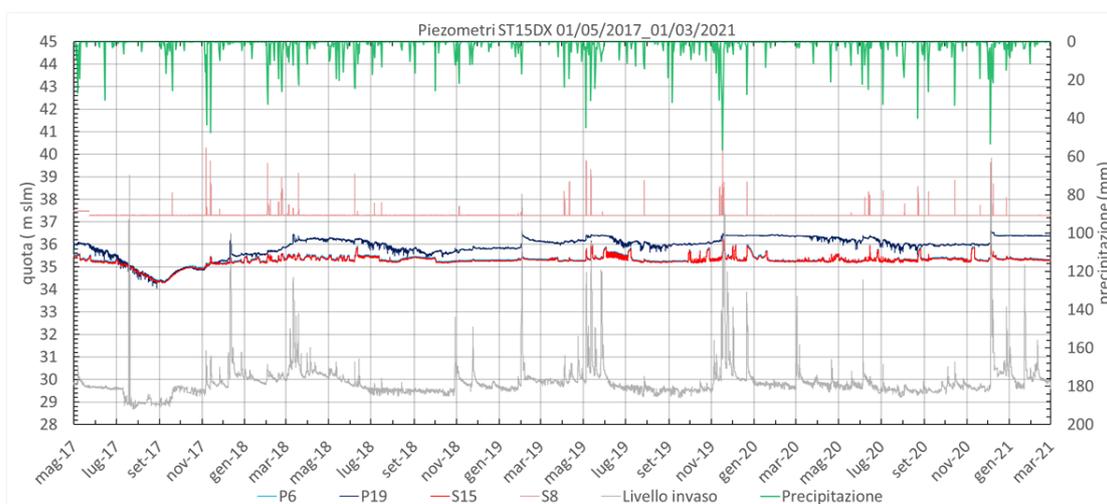


**Figura 53.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 35.0 m e un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

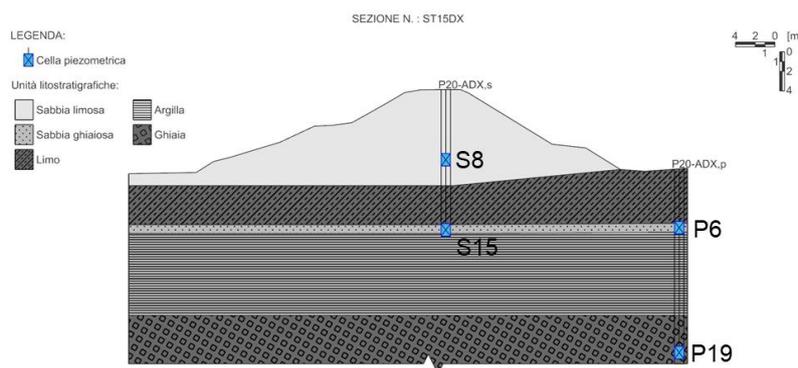
## SEZIONE ST15DX, PIEZOMETRI P20 – ADX

La sezione ST15DX come è riportato nella Figura 1 e nella Figura 2 è situata in destra idraulica nel tratto terminale dell'arginatura a monte della cassa sussidiaria. Questo tratto di arginatura quindi racchiude la porzione principale della cassa di espansione. L'arginatura in questo tratto si discosta dalla scarpata del terrazzo fluviale, la sezione è quindi caratterizzata da un dislivello tra la sommità arginale e il piano campagna esterno alla cassa più elevato che le sezioni precedenti ST8DX e ST4DX. I livelli di falda osservati dagli strumenti installati si attestano ad una quota ben più elevata della quota del pelo libero a cui si attestano le portate di magra. Come si nota in Figura 54, le osservazioni registrate dai piezometri, la cui posizione è riportata in Figura 55, presentano alcune anomalie che sembrano legate alle precipitazioni e nel periodo primaverile ad emungimenti con impianti di sollevamento. È stato comunque possibile definire un modello, la cui porzione in corrispondenza del corpo arginale è riportata in Figura 56, che ricostruisce in modo sufficientemente accurato l'evento del dicembre 2020 come riportato in Figura 57. Tali risultati confermano la presenza del diaframma come da progetto. La sezione invece non è stata sollecitata dall'invaso del maggio 2021 perché il livello massimo a cui si è attestato l'invaso è minore del piede dell'argine lato cassa e, come riportato in Figura 58, le uniche variazioni del carico osservate dai piezometri, hanno ricorrenza quasi

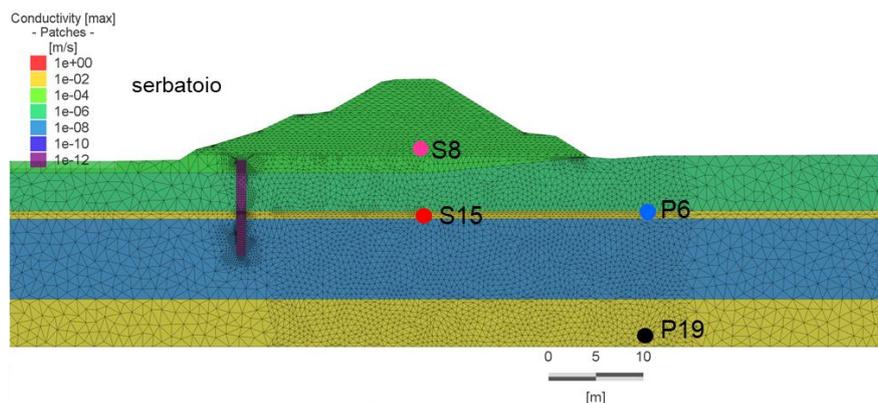
giornaliera e sembrano legate ad emungimenti in falda con impianti di sollevamento. Il modello della sezione così definito è stato utilizzato per simulare le sollecitazioni della seconda e della terza prova di invaso previste dal programma degli invasi utilizzando due differenti valori di conducibilità idraulica. Nella Tabella 14 e nella Figura 52 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Nella Tabella 15 e nella Figura 53 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando un valore di conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . In questa sezione, per entrambe le due prove di invaso, i risultati non variano notevolmente al variare della conducibilità idraulica del corpo arginale e delle condizioni iniziali della falda. Per un valore iniziale della falda pari al livello osservato nel maggio 2021 all'inizio della prima prova di invaso, valore piuttosto elevato tra quelli osservati per questa sezione e riportato nelle tabelle con l'asterisco, si può notare che, con entrambi i valori della conducibilità idraulica del materiale del corpo arginale e per entrambe le prove di invaso, non avviene l'emersione della falda a lato campagna dell'arginatura.



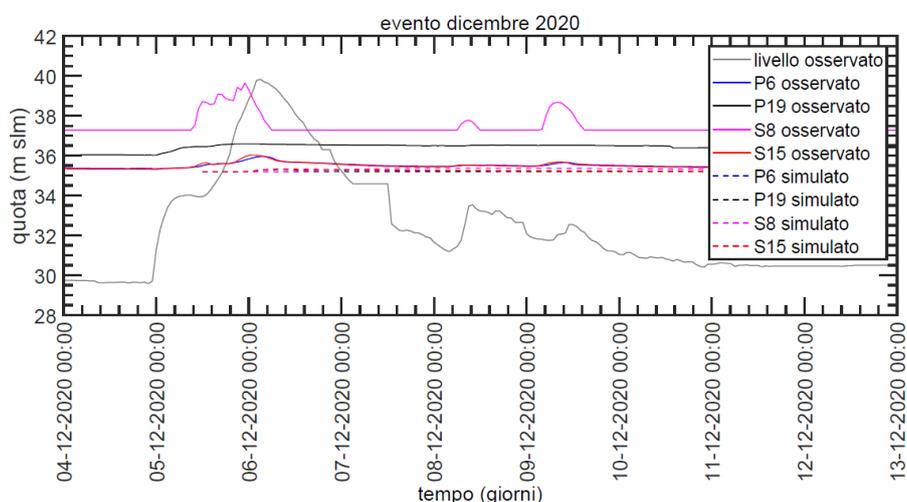
**Figura 54.** Andamento dei carichi osservati dai piezometri installati nella sezione ST15DX.



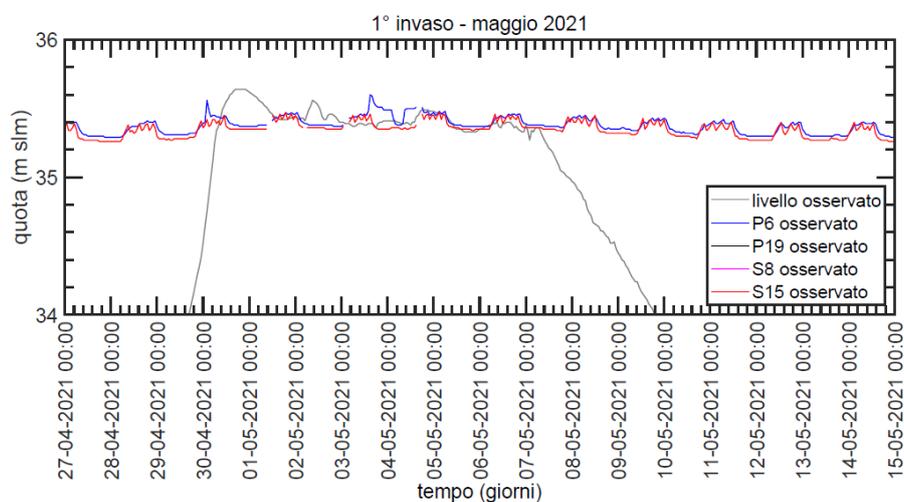
**Figura 55.** La stratigrafia ottenuta dall'analisi delle carote estratte durante l'installazione dei piezometri stessi. Nell'immagine è evidenziata anche la posizione delle celle piezometriche.



**Figura 56.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. I diversi valori di conducibilità idraulica mettono in evidenza come da progetto anche la presenza del diaframma, di lunghezza pari a 10 m, che è stato simulato imponendo una conducibilità pari a  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ . Nell'immagine è evidenziata la posizione delle celle piezometriche.



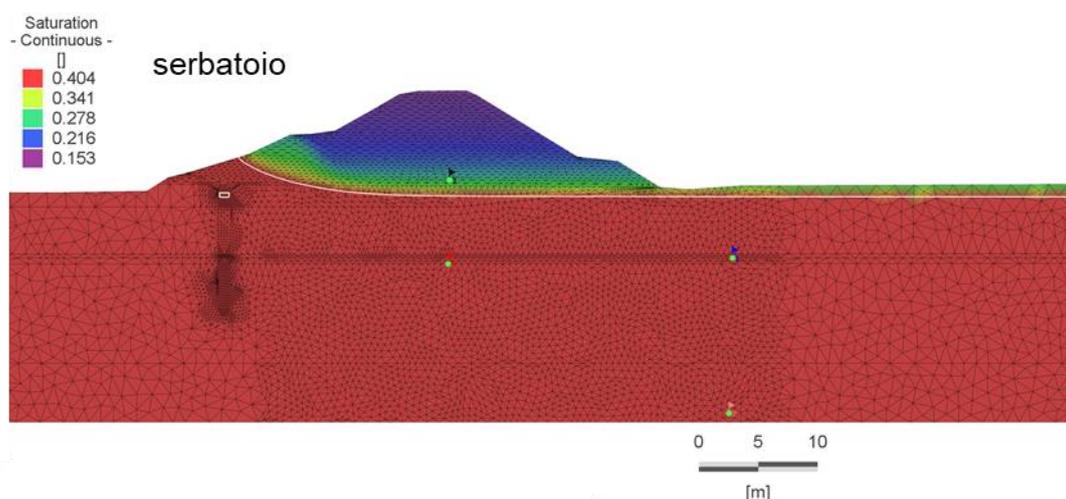
**Figura 57.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per l'evento di piena del dicembre 2020. I valori del piezometro P7 osservati presentano delle anomalie in quanto il carico si attesta in questo periodo a quote pari a 2 m slm. Il piezometro S8 e in maniera meno accentuata anche P6 e S15 presentano picchi anomali che sembrano legati alle precipitazioni.



**Figura 58.** Durante la prima prova di invaso si evidenziano variazioni periodiche del livello della falda con frequenza giornaliera, probabilmente legate ad emungimenti in falda con impianti di sollevamento.

	quota iniziale della falda (m slm)	
2° invaso	35.0	35.5 <sup>(*)</sup>
3° invaso	35.0	35.5 <sup>(*)</sup>

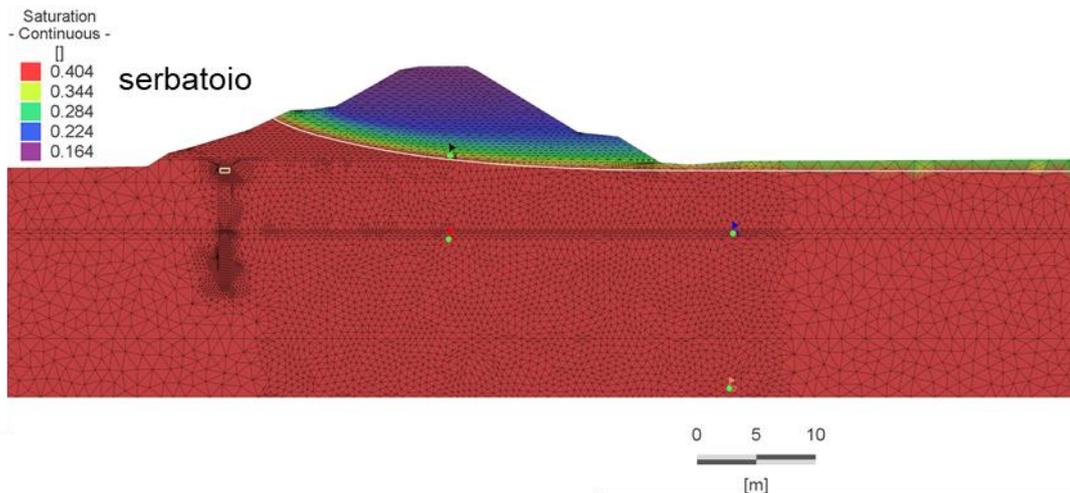
**Tabella 16.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 59.** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 35.5 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

	quota iniziale della falda (m slm)	
2° invaso	35.0	35.5 <sup>(*)</sup>
3° invaso	35.0	35.5 <sup>(*)</sup>

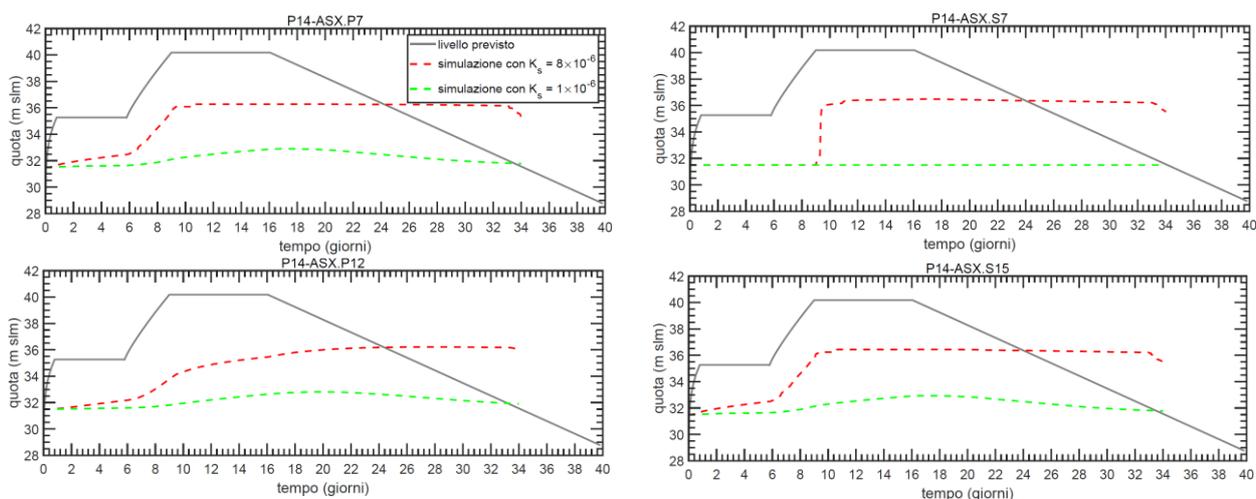
**Tabella 17.** Nella tabella sono riportati i valori della quota della falda considerati come condizione iniziale nelle simulazioni della seconda e della terza prova di invaso. Con la colorazione verde si evidenzia la combinazione in cui la posizione massima della linea di saturazione si attesta ad una profondità rispetto al piano campagna al piede esterno pari ad  $h \geq 1$  m. Con il colore giallo  $0 < h < 1$ . Con il colore rosso  $h = 0$ . I risultati sono stati ottenuti considerando per il materiale che costituisce il corpo arginale un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .



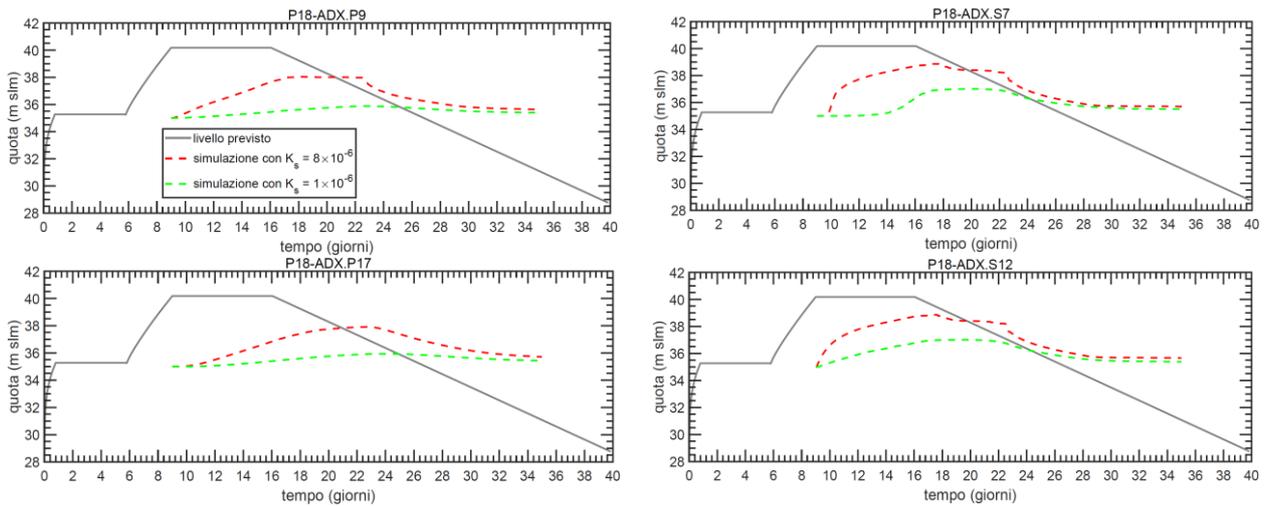
**Figura 60** La porzione del dominio di calcolo in corrispondenza dell'arginatura. In figura è riportato il contenuto idrico volumetrico (in rosso quello a saturazione) quando la linea di saturazione (linea bianca) raggiunge la quota più elevata in corrispondenza del piede dell'argine a lato campagna. Il caso rappresentato è ottenuto considerando la seconda prova di invaso prevista, il livello di falda iniziale pari a 35.5 m slm e un valore di conducibilità idraulica pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  per il materiale che costituisce il corpo arginale.

## CONSIDERAZIONI SULLA SECONDA E TERZA PROVA DI INVASO

Le analisi sulla seconda e terza prova di invaso così come previsto dal programma degli invasi ha permesso anche di evidenziare come tali sollecitazioni, maggiori sia in termini di durata che di livello rispetto alla prima, permetterebbero di dissipare i dubbi sul comportamento del corpo arginale permettendo di definire per calibrazione un valore della conducibilità idraulica anche per questa parte di ciascuno dei modelli precedentemente descritti. Nella Figura 61 e nella Figura 62 sono riportati gli andamenti dei piezometri così come prevista dai modelli considerando i due differenti valori di conducibilità idraulica già utilizzati in precedenza. È evidente la diversa risposta di ciascuno dei piezometri sia per una sezione posta in sinistra idraulica, sia per una sezione in destra.

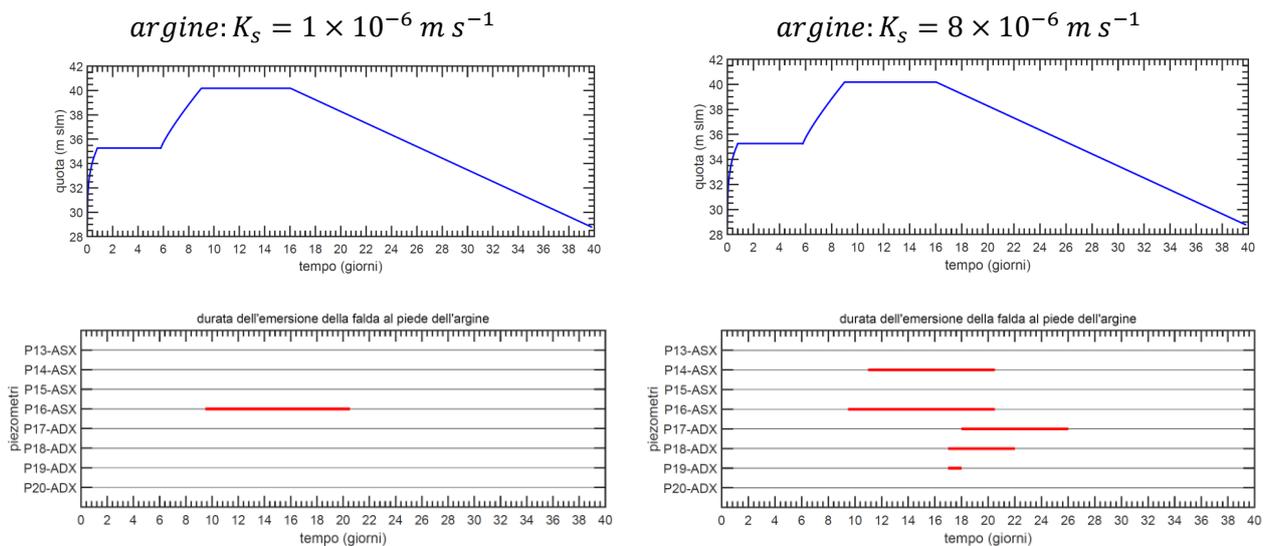


**Figura 61.** La risposta dei piezometri prevista a seguito della sollecitazione della sezione arginale ST4SX con un andamento del livello della seconda prova di invaso come da programma degli invasi sperimentali considerando i due differenti valori di conducibilità idraulica considerati.



**Figura 62.** La risposta dei piezometri prevista a seguito della sollecitazione della sezione arginale ST4DX con un andamento del livello della seconda prova di invaso come da programma degli invasi sperimentali considerando i due differenti valori di conducibilità idraulica considerati. Si è supposto che la sollecitazione dell'arginatura della cassa sussidiaria inizi in corrispondenza del raggiungimento del livello massimo.

Risulta essere inoltre di sicuro interesse per l'eventuale gestione delle successive prove di invaso l'eventuale permanenza, nelle sezioni in cui si manifesta, della linea di saturazione alla quota del piano campagna al piede esterno dell'arginatura. In Figura 63 è riportata per ciascuna sezione la durata della permanenza della linea di falda alla quota del piede dell'argine per i due valori di conducibilità idraulica considerati. Le sezioni sono sollecitate con l'andamento del livello previsto nella seconda prova di invaso. Nel caso in cui la conducibilità idraulica avesse un valore di pari a  $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ , l'unica sezione interessata dal fenomeno sarebbe la sezione ST12SX dove sono installati i piezometri P16-ASX che secondo quanto riportato dai progetti della cassa e secondo quanto emerge dalle simulazioni descritte in precedenza non è dotata di diaframma. Nel caso in cui la conducibilità idraulica avesse un valore di pari a  $8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ , in molte sezioni si manifesterebbe l'emersione della linea di falda al piede esterno dell'arginatura per tempi considerevoli.

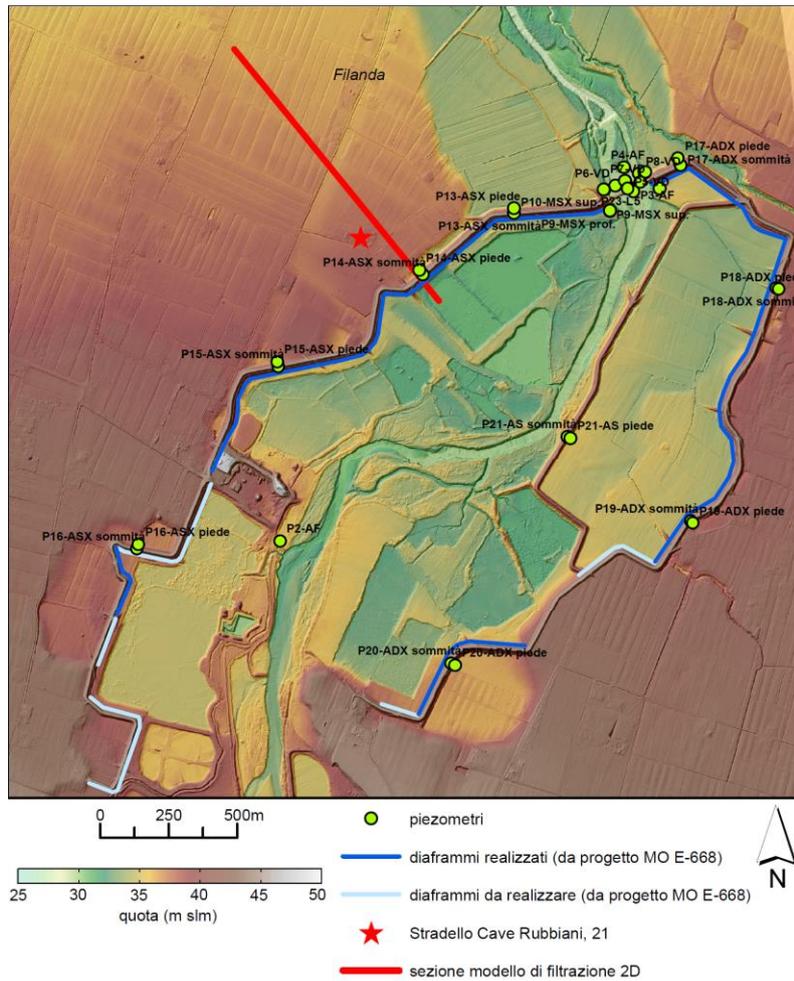


**Figura 63.** La durata dell'emersione della falda al piede dell'argine per i due valori di conducibilità idraulica del corpo arginale considerati nel caso in cui le sezioni arginali siano sollecitate dalla seconda prova di invaso come prevista dal programma degli invasi sperimentali del collaudo.

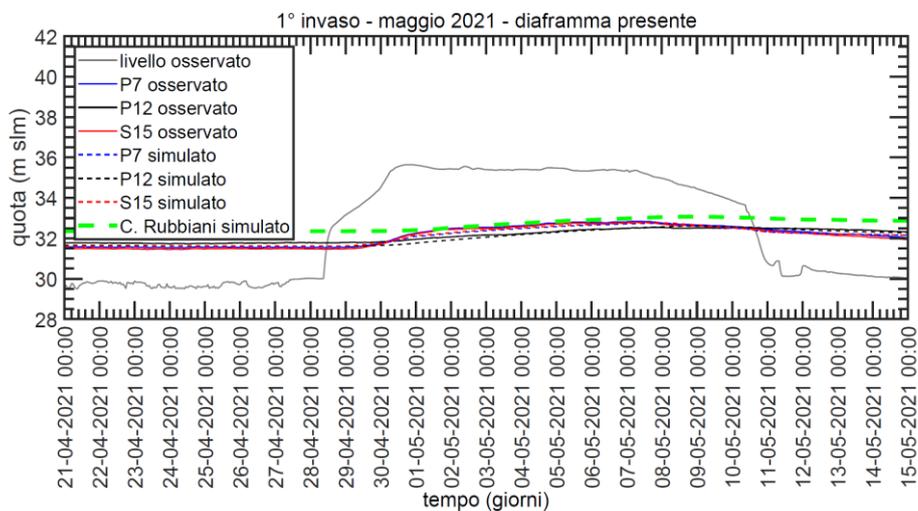
## ALLAGAMENTO STRADELLO CAVE RUBBIANI, 21

Il modello sviluppato per la sezione ST4SX è stato utilizzato per analizzare il fenomeno di allagamento che si è manifestato nel piano interrato di un'abitazione posta a qualche centinaio di metri d'arginatura in Stradello Cave Rubbiani al civico 21 durante la prima prova di invaso nel maggio 2021. La sezione considerata è perpendicolare all'arginatura principale e si estende nella direzione delle abitazioni in cui ha avuto luogo l'allagamento come riportato in Figura 64. Se si ipotizza la presenza del diaframma, come confermato anche dai risultati del modello riportati in precedenza per la sezione ST4SX, la linea di saturazione ricostruita in corrispondenza di Stradello Cave Rubbiani si attesterebbe (Figura 65) ad una quota di circa 33 m slm. Ipotizzando che il livello dell'allagamento fosse compreso tra i 35 e i 36 m slm, tra due e tre metri al di sotto del piano campagna, la linea di saturazione a 33 m slm non sarebbe stata causa di allagamenti. Ipotizzando invece l'assenza del diaframma, si otterrebbe un livello della falda, come riportato in Figura 66, pari a 36 m slm che sarebbe coerente con gli allagamenti osservati. L'ipotesi dell'assenza del diaframma però porta ad avere dei valori del carico in corrispondenza dei piezometri che si discostano notevolmente dai valori osservati durante la prima prova di invaso del maggio 2021. Questi risultati contrastanti suggeriscono l'ipotesi che nella sezione ST4SX effettivamente sia presente il diaframma e che in una qualche sezione arginale compresa tra la ST4SX e la ST8SX, anch'essa dotata di diaframma come riportato in precedenza, sia presente invece una discontinuità della diaframmatrice oppure una eterogeneità stratigrafica non evidenziata che causano una continuità dello strato a maggiore conducibilità idraulica tra la cassa e Stradello Cave Rubbiani. L'ipotesi della discontinuità nella diaframmatrice è suffragata da quanto riportato nella Figura 67. In tale figura è riprodotta la porzione della tavola con oggetto "Lavori di emergenza per la diaframmatrice di argini esistenti in sponda sinistra del fiume Panaro in località Str. Cave Montorsi – S. Damaso – in comune di Modena" datata 5 novembre 1984, in cui sono evidenziate le porzioni di arginatura dotate di diaframma, quelle in cui il diaframma era in costruzione e quelle in cui era in progetto. I sondaggi numero 4 e 5 riportati nella figura, sono stati presi come riferimento per posizionare i differenti tratti arginali planimetricamente. La posizione dei sondaggi numero 4 e 5 è riportata planimetricamente nella tavola dal titolo "Lavori di adeguamento a maggiori portate di ingresso", la cui porzione di interesse è proposta in Figura 68. In Figura 69 sono riportati i tratti di arginatura in cui i diaframmi erano già stati realizzati, in corso di realizzazione, e in progetto nel novembre del 1984 ed è chiaro che le porzioni di arginatura in cui il diaframma non è presente sono situate tra la sezione ST4SX e ST8SX in prossimità di Stradello Cave Rubbiani. I tratti di argine realizzati e da realizzare riportati in Figura 64 (progetto MO E-668) e in Figura 69 (Lavori di emergenza novembre 1984) sono differenti e non è ben chiara la cronologia delle due tavole da cui sono state tratte le differenti informazioni. Gli allagamenti occorsi in Stradello Cave Rubbiani farebbero comunque presupporre che lo stato descritto in Figura 69 sia più aderente alla realtà. L'ipotesi di una discontinuità stratigrafica potrebbe invece essere suffragata da un attento esame del modello digitale del terreno ad alta risoluzione riportato anche in Figura 64 si nota come tra le sezioni ST4SX e la ST8SX all'esterno della cassa di espansione il terrazzo fluviale sia caratterizzato da una depressione che inizialmente corre in direzione nord-ovest per poi piegare di circa 90 gradi in direzione nord-est correndo parallelamente a Stradello Montecatini nel quale è posta la località Filanda con l'omonima trattoria. Queste evidenze potrebbero condurre all'ipotesi della presenza di un paleo alveo la cui forza idraulica era utilizzata per alimentare l'opificio. Nel qual caso potrebbe essere plausibile che, in corrispondenza dell'intersezione tra il corpo idrico antico e l'arginatura, vi sia una eterogeneità stratigrafica che la diaframmatrice, seppur presente, non è riuscita ad intercettare completamente. Sebbene vi siano maggiori indizi a supporto della prima ipotesi non è da escludere del tutto il concorso delle due cause agli allagamenti. L'utilizzo del modello della sezione ST4SX ipotizzando l'assenza del diaframma può essere considerato quindi uno strumento per simulare gli effetti degli invasi sulle abitazioni di Stradello Cave Rubbiani sebbene non rispecchi il comportamento reale di tale sezione. Utilizzando quindi questo strumento si è simulato il possibile effetto della seconda prova prevista dal programma degli invasi sulle abitazioni di Stradello Cave Rubbiani. La permanenza di livelli piuttosto elevati

per lungo tempo, come riportato in Figura 70, porterebbe la linea di saturazione ad attestarsi in prossimità del piano campagna (circa 38 m slm) determinando allagamenti di maggiore entità rispetto a quelli avvenuti durante la prima prova di invaso.

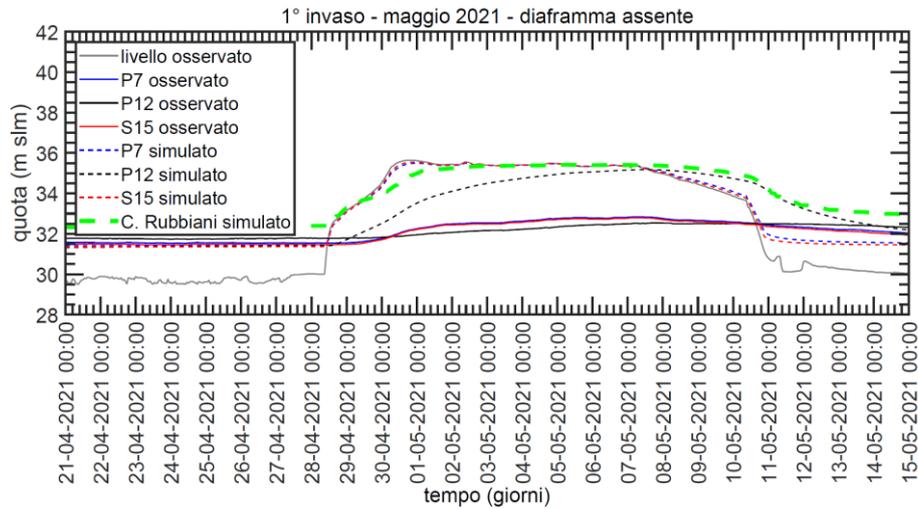


**Figura 64.** In evidenza rispetto alla Figura 1 la posizione dell’immobile in cui si è manifestato l’allagamento durante il primo invaso sperimentale, e la sezione considerata per ricostruire l’evento.

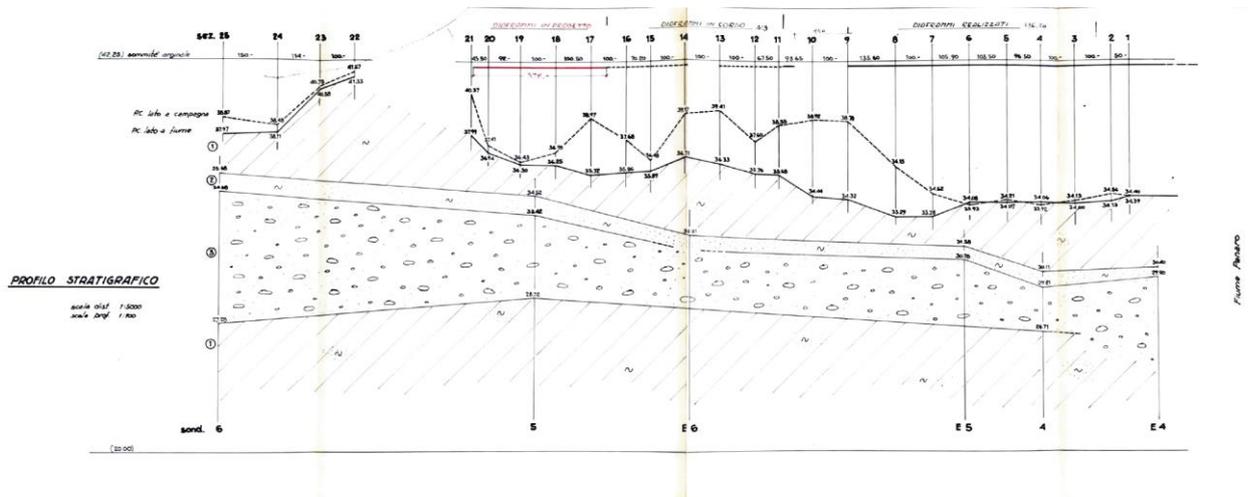


**Figura 65.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per la prima prova di invaso del maggio 2021. In evidenza l’andamento del carico in prossimità di Stradello Cave Rubbiani. Nel caso si

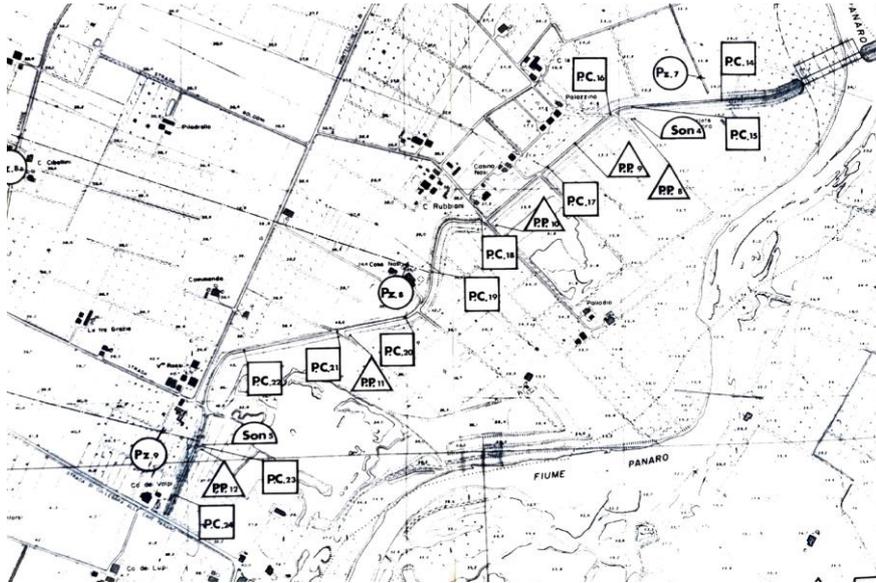
ipotizzi la presenza del diaframma non si riscontrano incrementi del livello della falda tali da causare allagamenti ai piani interrati.



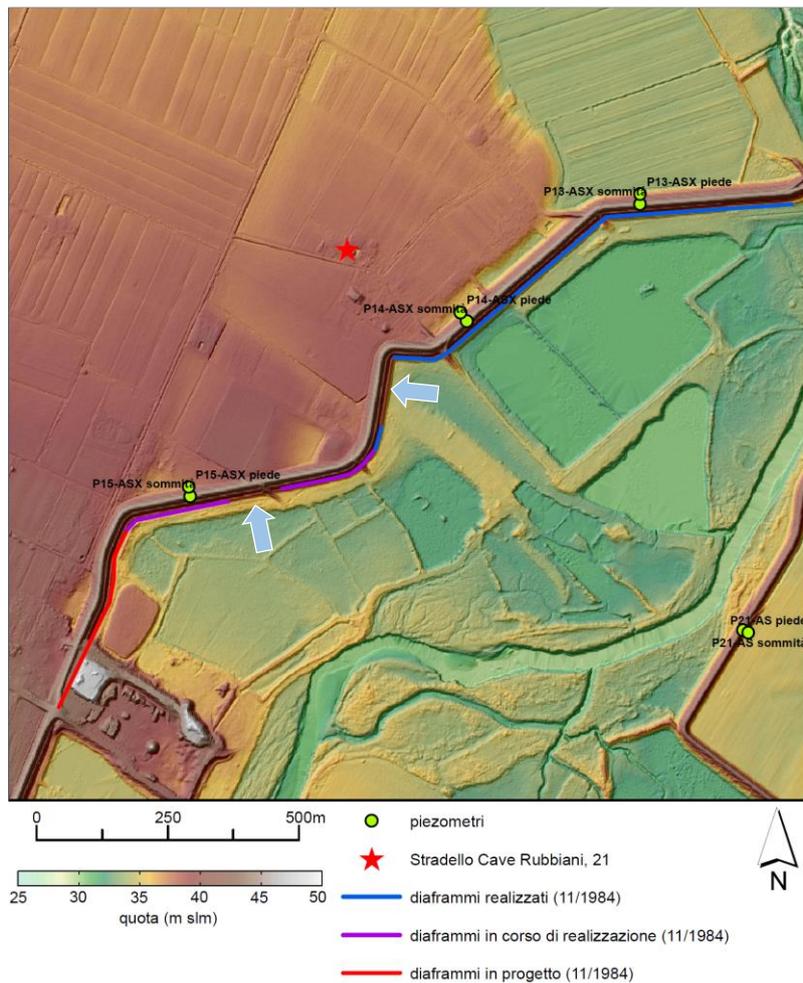
**Figura 66.** Il confronto tra i valori del carico osservati e quelli ricostruiti con il modello di filtrazione per la prima prova di invaso del maggio 2021. In evidenza l'andamento del carico in prossimità di Stradello Cave Rubbiani. Nel caso si ipotizzi l'assenza del diaframma si riscontrano incrementi del livello della falda tali da causare allagamenti ai piani interrati.



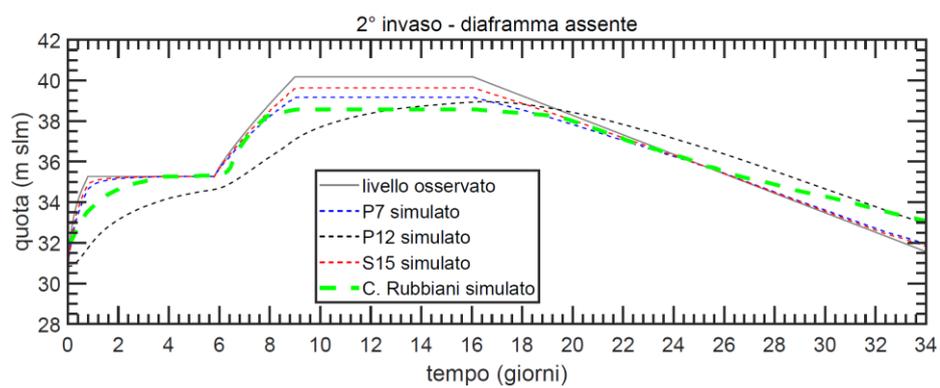
**Figura 67.** La porzione della tavola con oggetto "Lavori di emergenza per la diaframmatatura di argini esistenti in sponda sinistra del fiume Panaro in località Str. Cave Montorsi – S. Damaso – in comune di Modena" datata 5 novembre 1984, in cui sono evidenziate le porzioni di arginatura dotate di diaframma, quelle in cui il diaframma era in costruzione e quelle in cui era in progetto. La presenza del diaframma non è continua.



**Figura 68.** La porzione della tavola con oggetto “Lavori di adeguamento a maggiori portate di ingresso” in cui sono evidenziate le posizioni dei sondaggi 4 e 5.



**Figura 69.** I tratti di arginatura in cui i diaframmi erano già stati realizzati (linea blu), in corso di realizzazione (linea viola), in progetto (linea rossa) nel novembre del 1984. Le due frecce in azzurro evidenziano le porzioni di arginatura in cui il diaframma non è presente. Entrambe queste porzioni sono tra la sezione ST4SX (piezometri P14-ASX) e ST8SX (piezometri P15-ASX) in prossimità di stradello Cave Rubbiani.



**Figura 70.** I valori del carico ottenuti con il modello di filtrazione per la seconda prova di invaso prevista. In evidenza l'andamento del carico in prossimità di Stradello Cave Rubbiani nel caso si ipotizzi l'assenza del diaframma.

## COCLUSIONI

I modelli bidimensionali di filtrazione arginale sviluppati, permettono una ricostruzione generalmente fedele dei carichi osservati attraverso la rete di piezometri installati durante l'evento di piena del dicembre 2020 e la prima prova di invaso del maggio 2021. I modelli così costruiti mettono però in evidenza che lo strato di materiale che costituisce i corpi arginali non mai è stato sollecitato a sufficienza per poter valutare sperimentalmente la sua conducibilità idraulica e poterne definire un valore attraverso un processo di calibrazione. Il modello della sezione ST12SX ha permesso di trovare conferme sul fatto che, come riportato nel progetto MO E-668, la porzione di arginatura su cui insiste è priva di diaframma. I modelli calibrati possono essere utilizzati per la previsione dei moti di filtrazione indotti dalla sollecitazione delle arginature attese nella seconda e nella terza prova di invaso. Con queste sollecitazioni si evidenziano in alcune sezioni delle criticità legate al permanere di elevati livelli di invaso per lungo tempo all'interno del serbatoio. Tali criticità possono essere più o meno estese in funzione del livello di falda considerato come condizione iniziale e in funzione del valore della conducibilità idraulica alla saturazione considerato per il rilevato arginale. L'analisi della porzione di arginatura in corrispondenza di Stradello Cave Rubbiani al civico 21, ha messo in evidenza come l'allagamento che si è manifestato in occasione della prima prova sperimentale di invaso nel maggio 2020 possa essere stato causato o da una eterogeneità stratigrafica o da una non perfetta continuità del diaframma tra le sezioni ST4SX (piezometri P14) e ST8SX (piezometri P15), oppure dal concorso delle due cause. L'analisi di alcune tavole di progetto risalenti agli anni ottanta suffraga l'ipotesi evidenziata dai modelli numerici che vi possano essere discontinuità nel diaframma proprio in corrispondenza di Stradello Cave Rubbiani.

## BIBLIOGRAFIA

Moretti G., S. Orlandini, *Propagazione delle onde di esondazione generate dall'ipotetico collasso della cassa di espansione di Sant'Anna sul fiume Panaro*. Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Giugno 2020.

Orlandini, S., G. Moretti, and J. D. Albertson (2015), *Evidence of an emerging levee failure mechanism causing disastrous floods in Italy*, *Water Resour. Res.*, 51, 7995–8011, doi:10.1002/2015WR017426.