

APPROFONDIMENTO SULLA POTENZIALE INTRUSIONE DEL CUNEO SALINO



Immagine satellitare e area di scavo in prossimità del Fiume Magra.

Tecnici Estensori

Ing. Carlo Grassi

Dott. Pietro Curzio

Data: novembre '18

Sommario

Premessa	3
Analisi del contesto	3
Il modello	19
Risultati	20
Discussione e conclusioni.....	28

Premessa

Per verificare la dinamica delle acque sotterranee nell'area del progetto, prima e dopo la sua realizzazione sono state prese in considerazione le caratteristiche dell'area, da un punto di vista idrologico, idrogeologico, della chimica delle acque in fiume e nei corpi idrici sotterranei anche nelle loro variazioni annuali, nonché della geologia della zona.

Analisi del contesto

Nelle illustrazioni seguenti l'andamento della superficie piezometrica risulta variare nel corso dell'anno, in particolare arretrando verso monte nel periodo estivo (vd. Carta isopiezometrica relativa al settembre 1999).

REGIONE LIGURIA PROVINCIA DELLA SPEZIA AREA 7: DIFESA DEL SUOLO MESSA IN SICUREZZA IDRAULICA
DEL TRATTO FOCIVO DEL FIUME MAGRA DAL TORRENTE ISOLONE FINO ALLA FOCE IN SPONDA SINISTRA E
DAL TORRENTE CANAL GRANDE FINO ALLA FOCE IN SPONDA DESTRA
PROGETTO DEFINITIVO/ESECUTIVO - I STRALCIO RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

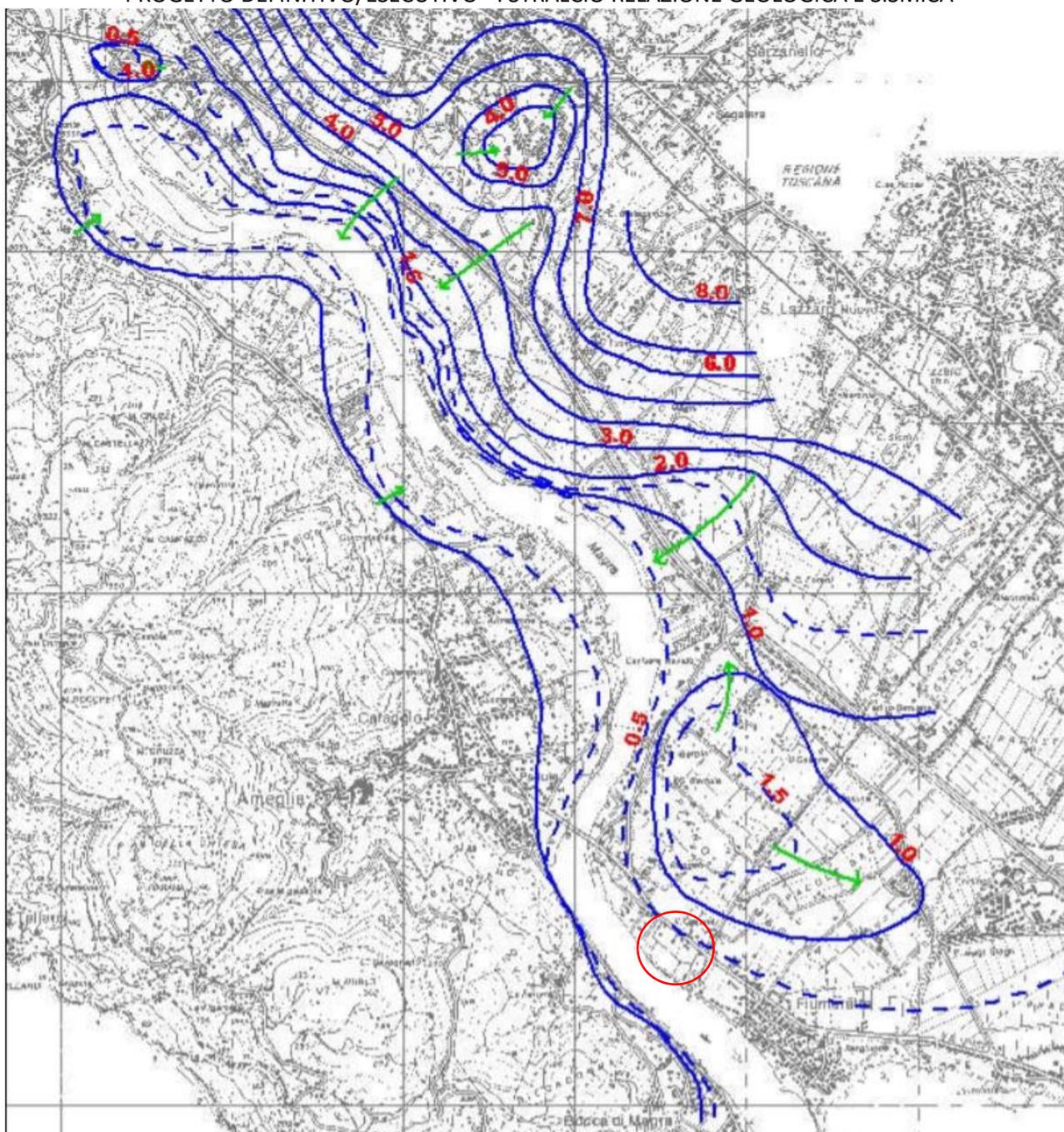


Fig. 1 Carta isopiezometrica dicembre 2000 (fonte: ACAM-Geoplan)

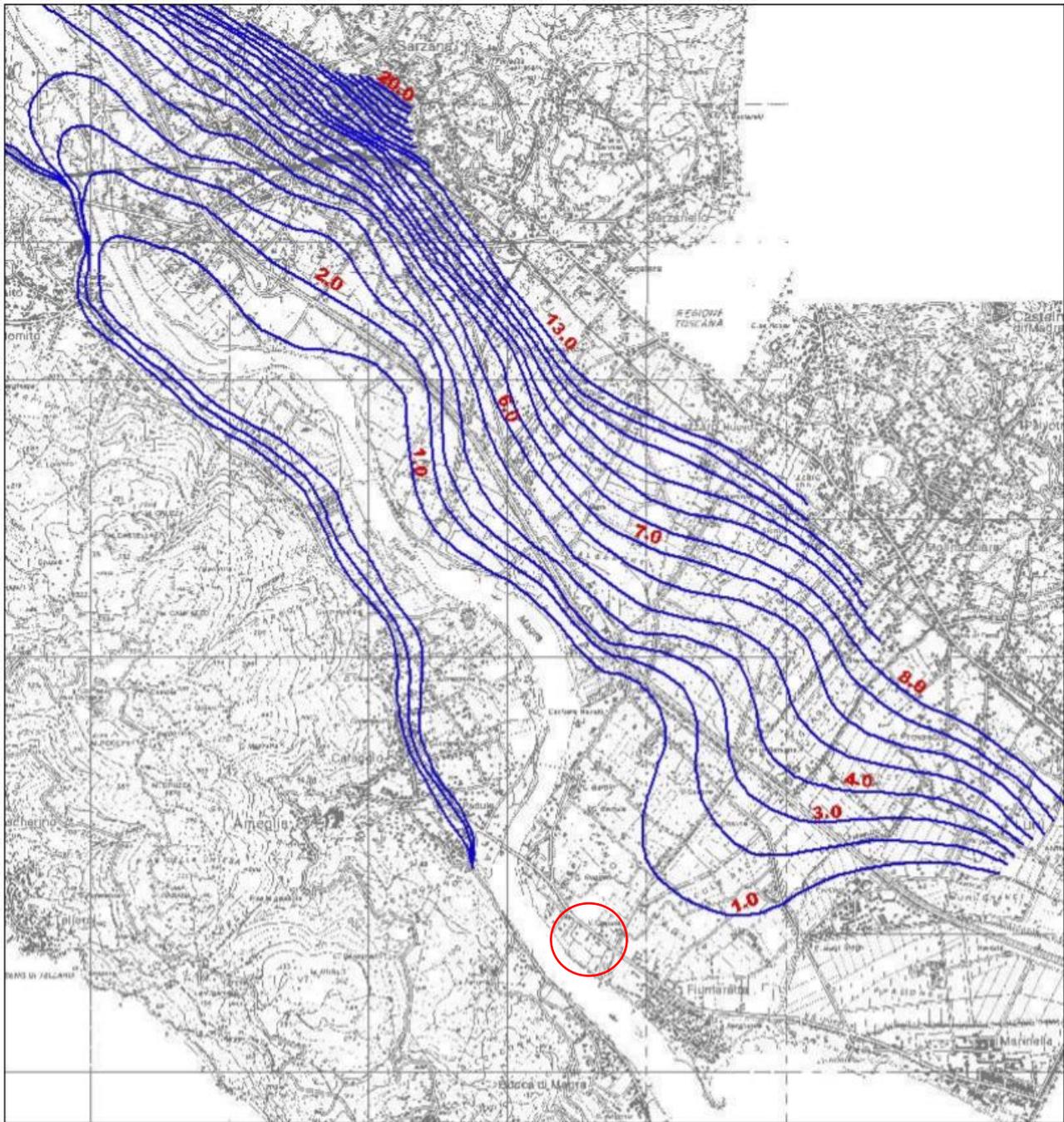


Fig. 2 Carta isopiezometrica (stralcio) dicembre 1993 (fonte: Termomeccanica-Ecoter)

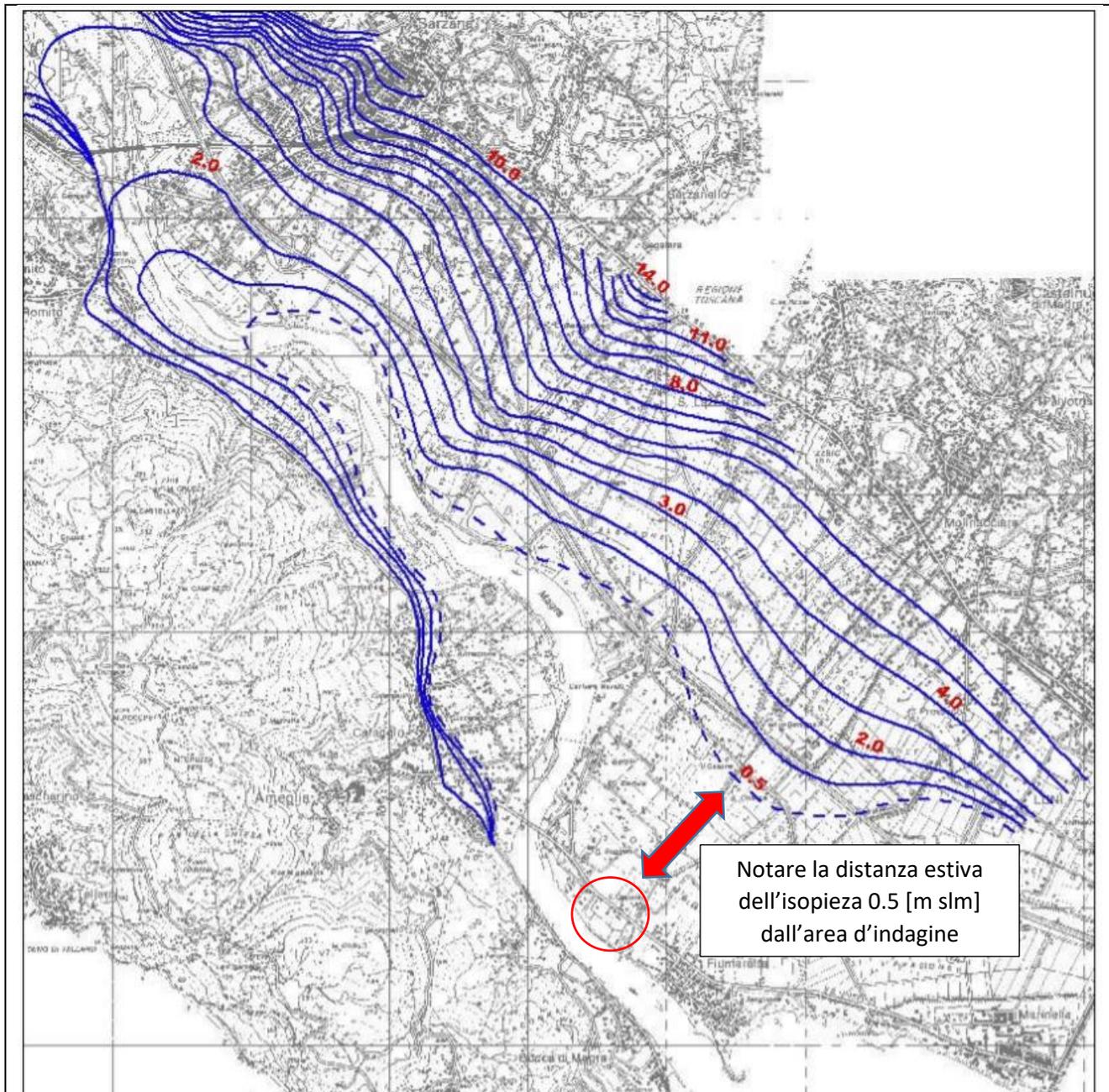


Fig. 3 Carta isopiezometrica (stralcio) relativa al mese di settembre 1993, periodo di minimo relativo (fonte:Termomeccanica-Ecoter)

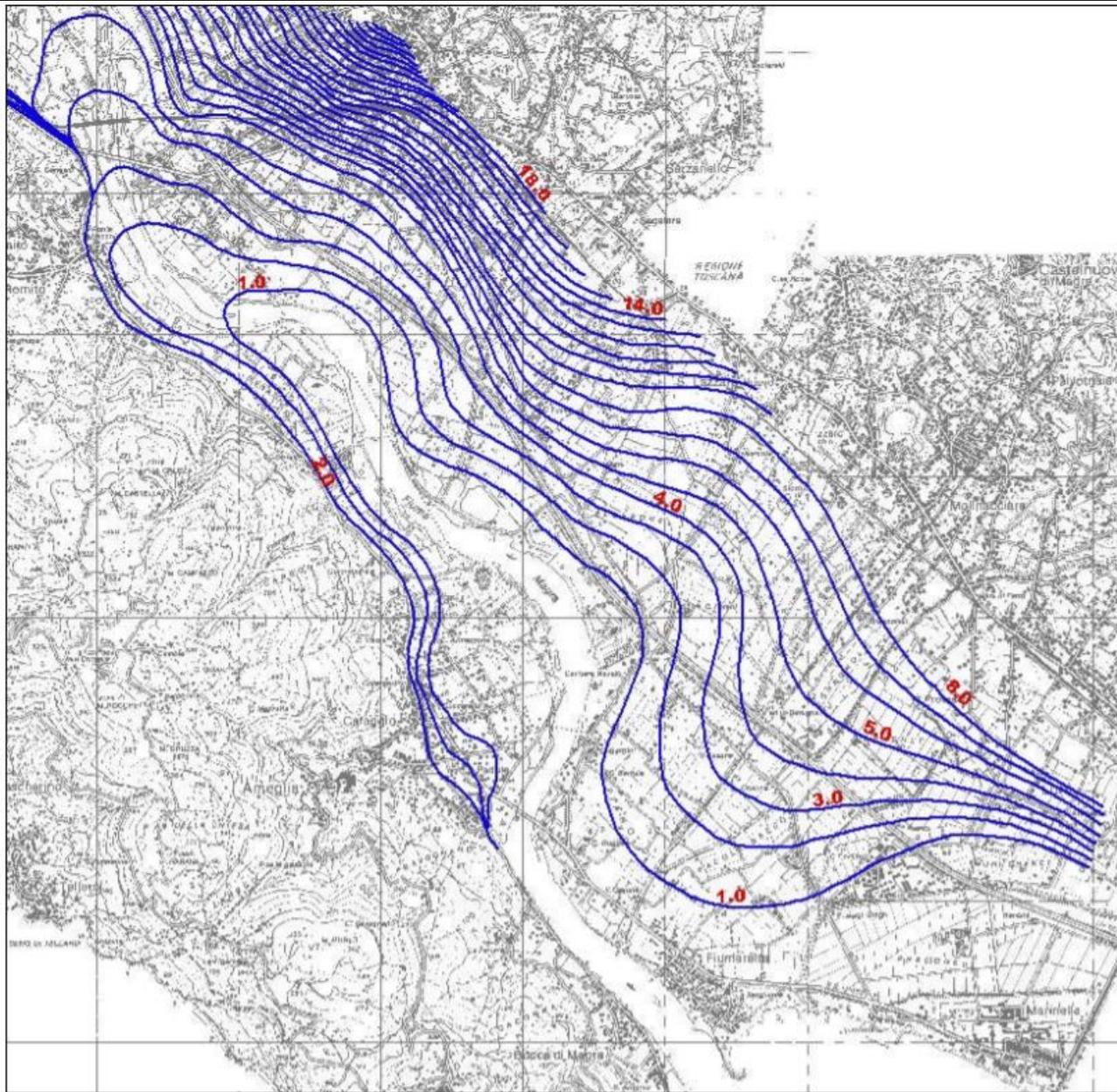


Fig. 4 Carta isopiezometrica (stralcio) relativa al mese di novembre 1993, periodo di massimo relativo (fonte: Termomeccanica-Ecoter)

Le portate del Fiume Magra, fiume dal carattere torrentizio, riflettono le piovosità della zona che sono molto ridotte nei mesi estivi. In particolare le medie delle precipitazioni risultano al di sotto dei 75 mm nei mesi di giugno, luglio ed agosto e le portate medie al di sotto dei 25 mc/s alla stazione di Calamazza (932 kmq).

L'acqua di mare ha in genere una salinità, misurata come frazione massica, di circa 35 g/kg ovvero 35 grammi di sale per chilogrammo di soluzione, ppt permille, che equivalgono a 35 PSU (Practical Salinity Units), corrispondente al rapporto tra la conduttività di un campione di acqua di mare e quella di una soluzione standard) e 42.9 mS/cm [IOC, SCOR, and IAPSO (2010). *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties*. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO (English). pp. 196pp.]

Tipologia d'acqua	Conducibilità ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Acqua pura	0.055
Acqua distillata	0.5
Acqua oligominerale	1.0
Acqua potabile	500 – 800
Acqua potabile (valore massimo)	1'055
Acqua per irrigazione	2'500-3'000
Acqua di mare	56'000
Acqua ipersalina	100'000

Tabella 4 – Conducibilità di vari tipi d'acqua naturale.

Le intrusioni dell'acqua di mare nel Fiume Magra misurate al ponte di Colombiera, stazione MAMA 09, un chilometro circa a monte del sito di interesse, sono evidenti, in particolare nei mesi estivi e nella porzione più profonda del fiume. La media triennale della salinità è 12.4 PSU con un range compreso tra 0.2 e 36.1. L'ampia variabilità è funzione delle portate del fiume.

file:///C:/Users/pietr/Dropbox/Pietro_Lavori/Marinazzurra/relazione_triennio_2011_2013_PROVINCIA_2_.pdf

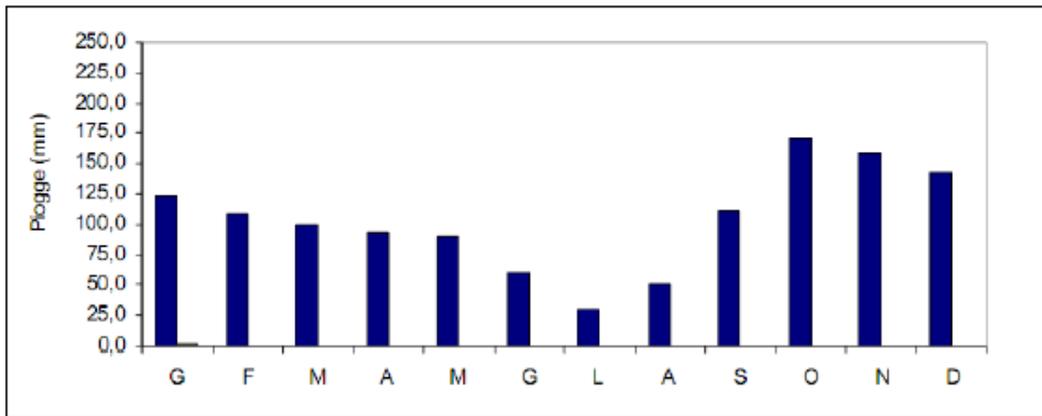


Figura 8 - Valori medi mensili delle precipitazioni totali per alcune stazioni di misura rappresentative. Stazione di Sarzana (26 m s.l.m.).

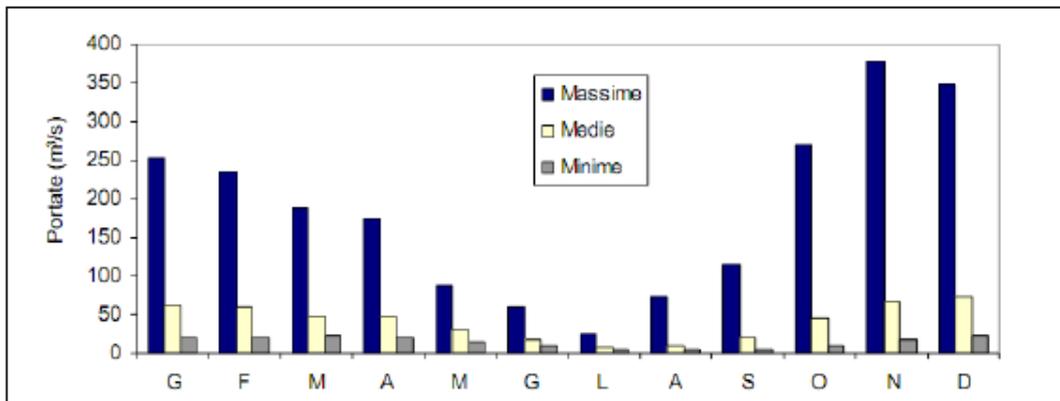


Figura 9 – Valori medi mensili delle portate massime, medie e minime giornaliere per le principali stazioni idrometriche lungo il F.Magra a Calamazza (44.5 m s.l.m.; bacino sotteso: 932 km²)

Punto di prelievo: Ponte della Colombiera

PARAMETRI/osservazioni	13/08/2013	24/07/2013	26/06/2013
T°aria	29.0	27.8	23.2
T°acqua	26.0	23.9	20.7
O.D. mg/l	9.6	8.7	8.4
O.D. %	102	110	97
pH	8.5	8.6	8.5
Conducibilità	nd	32.7	8.83

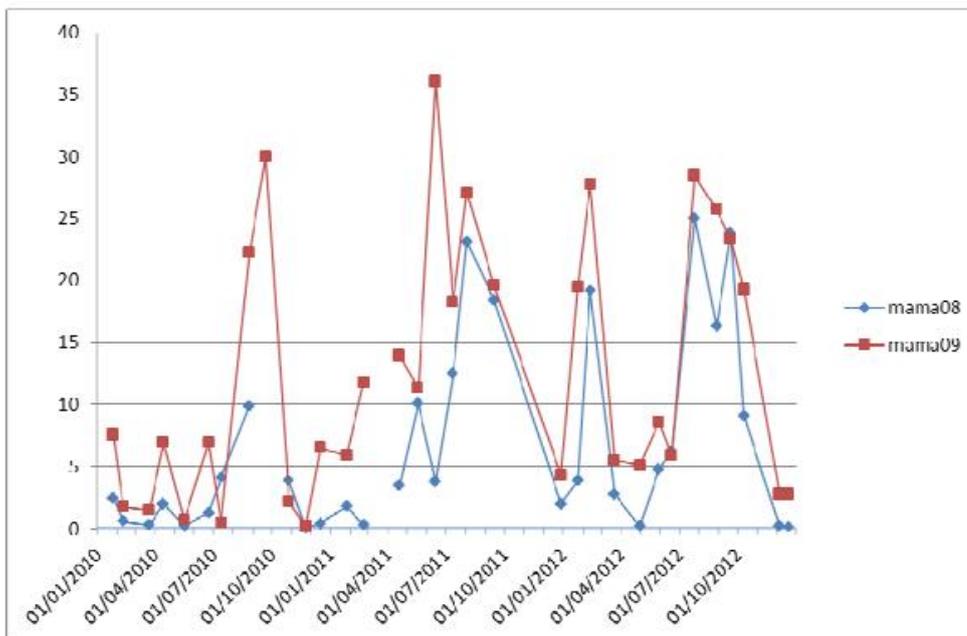


Figura 25: confronto tra l'andamento della salinità (PSU) rilevata nelle stazioni MAMA 08 e MAMA 09 nel 2010-12.

Solo nei mesi tardo-estivi l'acqua delle due stazioni può essere classificata eurialina: in estate si assiste ad apporti fluviali contenuti e il fenomeno dell'evaporazione è più pressante a causa di temperature elevate. Generalmente ci troviamo di fronte ad acque mesoaline, con variabilità pronunciata: nei periodi primaverili, autunnali e invernali, i valori di salinità tendono a diminuire, grazie a un apporto fluviale maggiore ed a precipitazioni atmosferiche più abbondanti rispetto agli altri periodi dell'anno. Nella stazione MAMA 08 (più a monte) troviamo un valore medio su base triennale di 6.6 PSU con un range compreso tra 0.1 e 25 PSU; nella stazione MAMA 09 (più vicina al mare) la media triennale della salinità è 12.4 PSU con un range compreso tra 0.2 e 36.1.

A titolo esemplificativo, interessante è osservare il cuneo salino riscontrato durante le campagne del 2011. Nella figura 26 si riporta la situazione rilevata nella stazione MAMA 09 (ponte della Colombiera), più vicina alla foce e nella successiva figura 27 si rappresenta la situazione nella stazione MAMA 08 (loc. Camisano), posta più a monte.

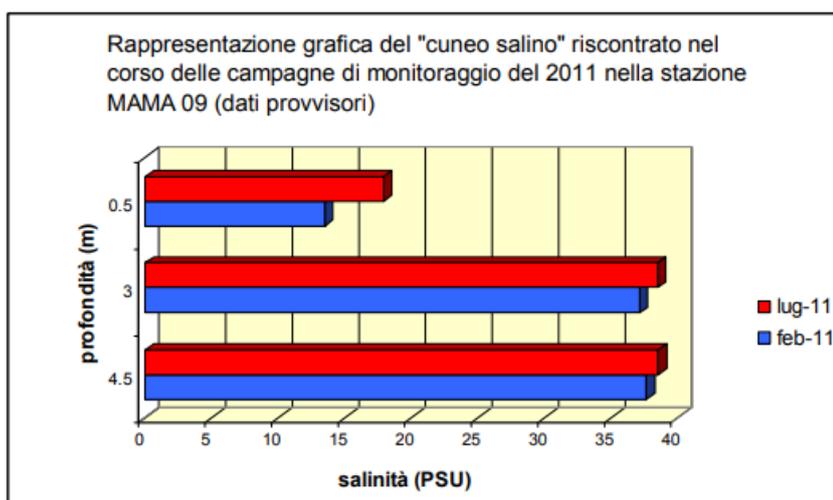


Figura 26: distribuzione stagionale della salinità (PSU) nella colonna d'acqua rilevata nella stazione MAMA09 nel 2011

Rappresentazione grafica del "cuneo salino" riscontrato nel corso delle campagne di monitoraggio del 2011 nella stazione MAMA 08 (dati provvisori)

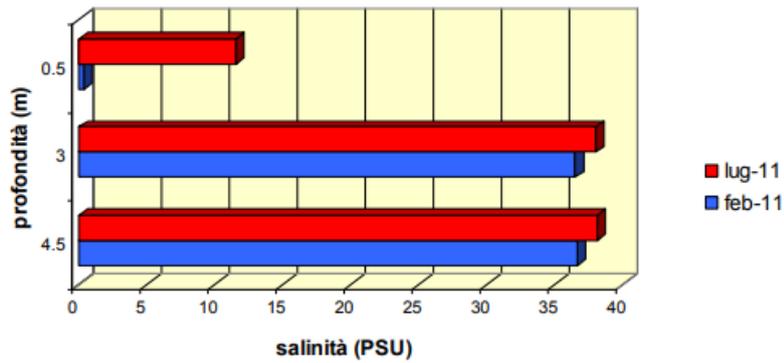


Figura 27: distribuzione stagionale della salinità (PSU) nella colonna d'acqua rilevata nella stazione MAMA08 nel 2011

Dalle due precedenti figure è possibile osservare la presenza costante del "cuneo salino", già evidente a circa 1-1.5 m di profondità (valori >35 PSU). Lo strato superficiale (misurazione a 0.5 m di profondità) presenta valori significativamente più bassi risentendo degli effetti del regime idraulico del bacino (regime di magra estivo e morbida-piena autunnale, vedi strato superficiale della stazione MAMA 08: 0.34 vs 11.57 PSU) e delle diverse situazioni di deflusso idrico stagionali (inverno vs estate), oltre che dalla vicinanza alla foce (MAMA09 vs MAMA08).

Nel sito d'interesse sono state analizzate le quote piezometriche in punti di monitoraggio a distanze variabili dal fiume, in particolare nel 2010 – 2011. Per l'attuale progetto è particolarmente significativo l'allineamento dei Piezometri P5, P4 e P3 che sono disposti in quest'ordine dal fiume verso l'entroterra, rispettivamente a circa 160 m, 330 m e 660 m dal fiume.

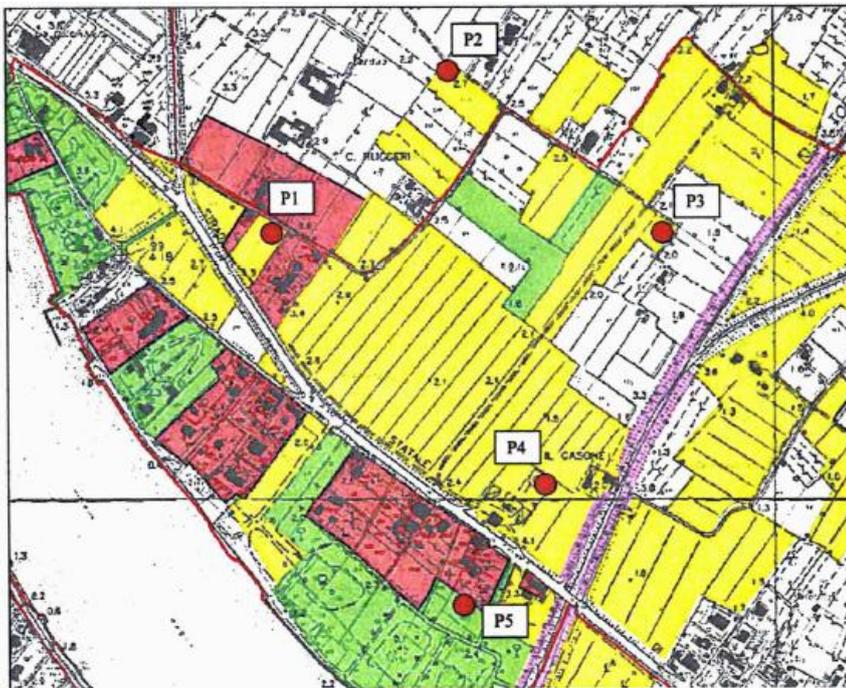


Figura 3 – Ubicazione dei piezometri.

(MEDINGEGNERIA 2011)

nome piezometro	quota piezometrica a 08-02-2011	quota piezometrica a 18-05-2010	quota piezometrica a 17-05-2011
P1	0.8	1.10	0.6
P2	1.5	0.93	0.6
P3	0.9	1.22	1.0
P4	0.5	0.42	0.1
P5	0.8	0.45	0.6

Nei mesi piovosi la quota della falda è generalmente maggiore nell'entroterra rispetto al lungofiume ($P3 > P4 > P5$); nei mesi di magra invece le quote piezometriche sono maggiori in prossimità del fiume ($P5 > P4 > P3$).

nome piezometro	quota piezometrica a 13-09-2010
P1	0.7
P2	0.2
P3	-0.1
P4	0.2
P5	0.6

LEGENDA LITOSTRATIGRAFICA	
	Materiale eluvio-colluviale di pendio
	Limi sabbiosi e sabbie limose fini
	Argilla limosa e limo debole/sabbioso localmente con livelli e lenti di ghiaia e torba (T)
	Faglie
	Sabbia e sabbia fine limosa e/o limo-argillosa, localmente con lenti e/o livelli di ghiaia
	Ghiaia sabbiosa e sabbia ghiaiosa, a luoghi con intercalazioni sottili di argille limose
	Substrato roccioso (in metasedimenti della successione metamorfica di P.ta Blanca (Verrucano del Dominio Toscano))

(MEDINGEGNERIA 2011)

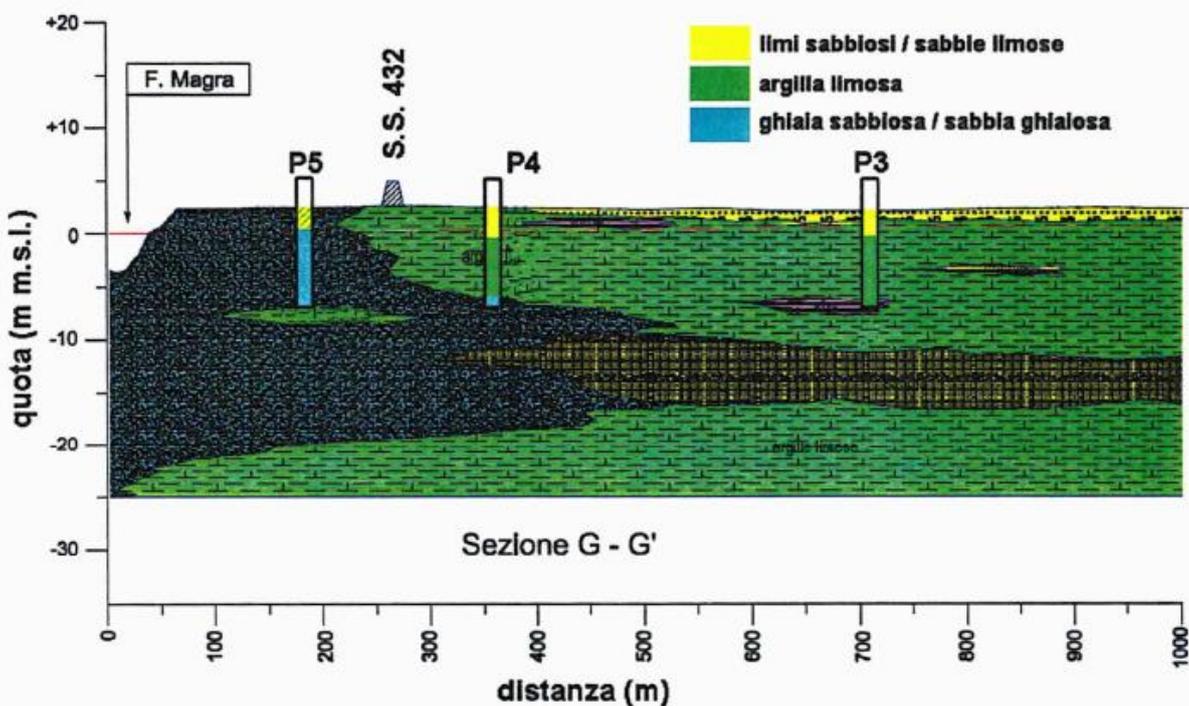
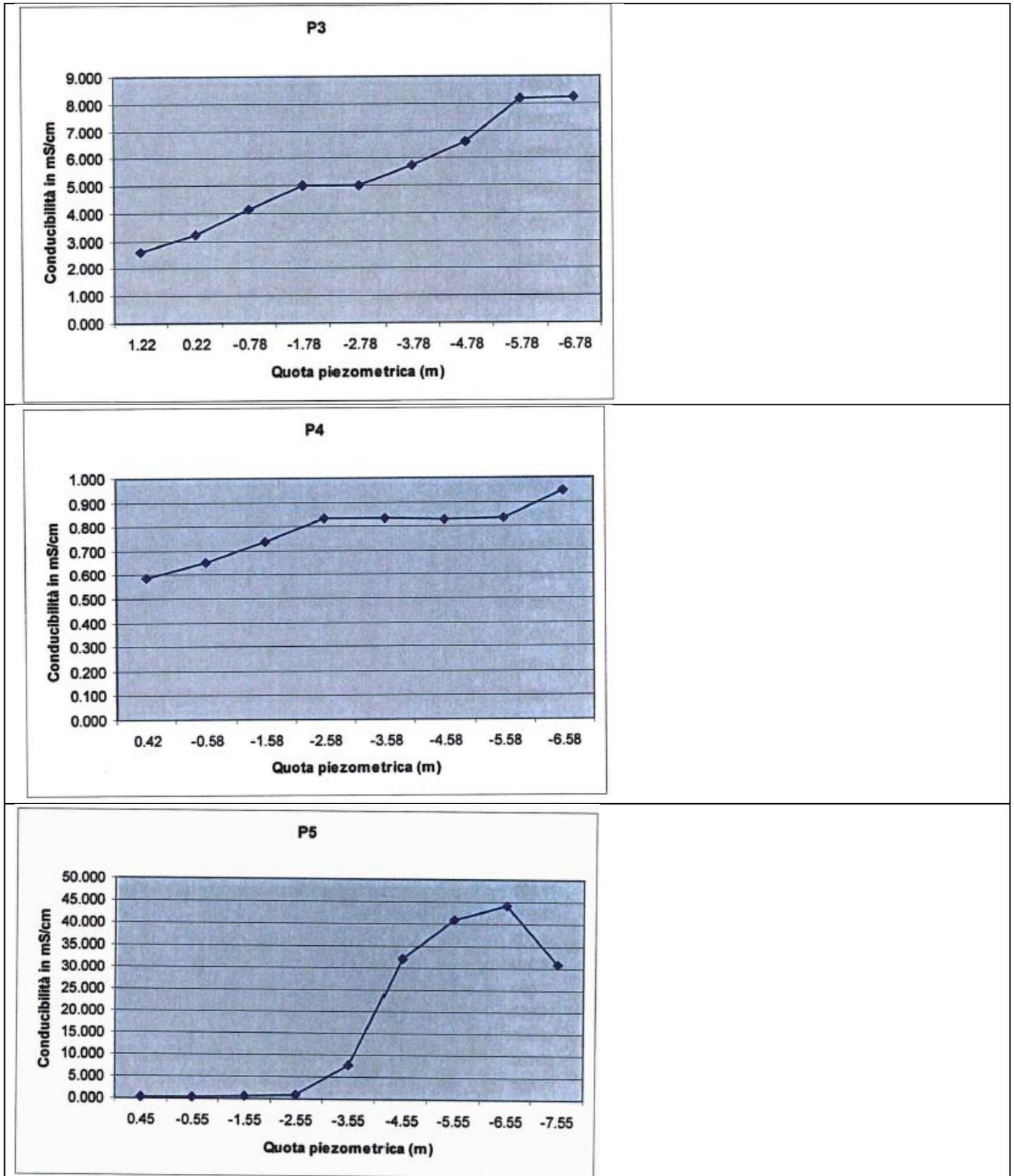
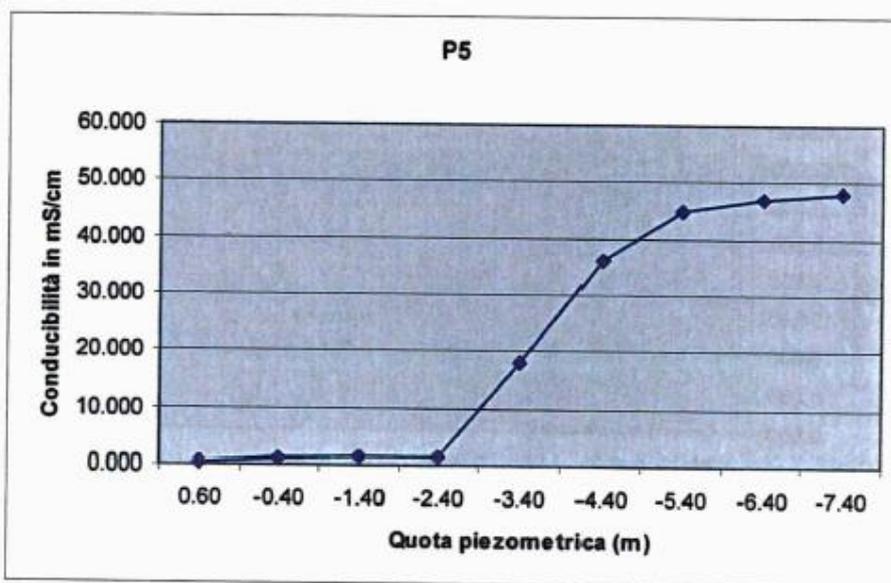
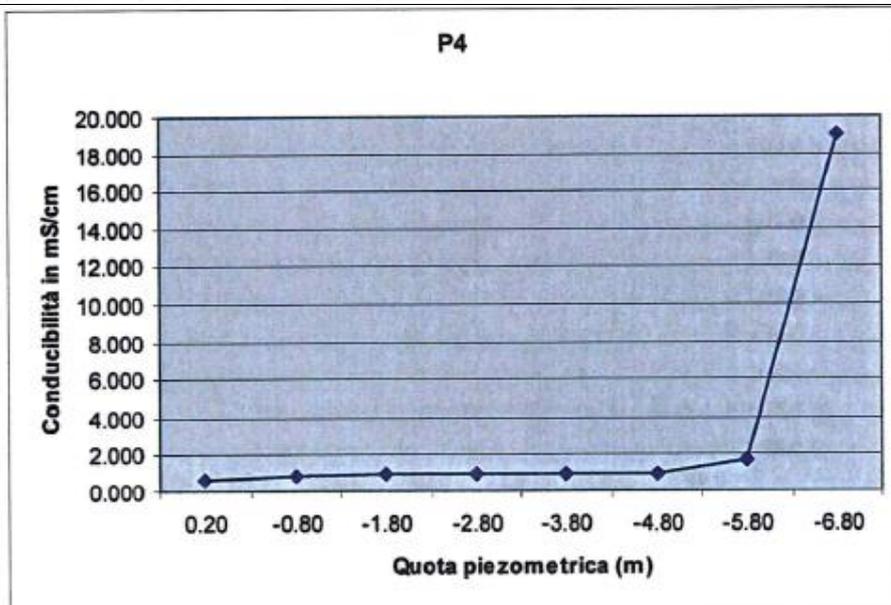
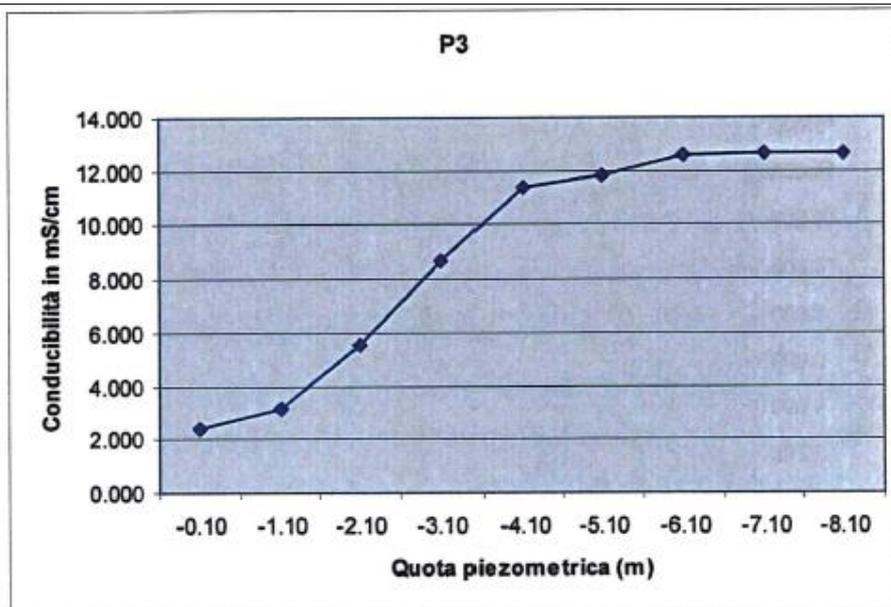


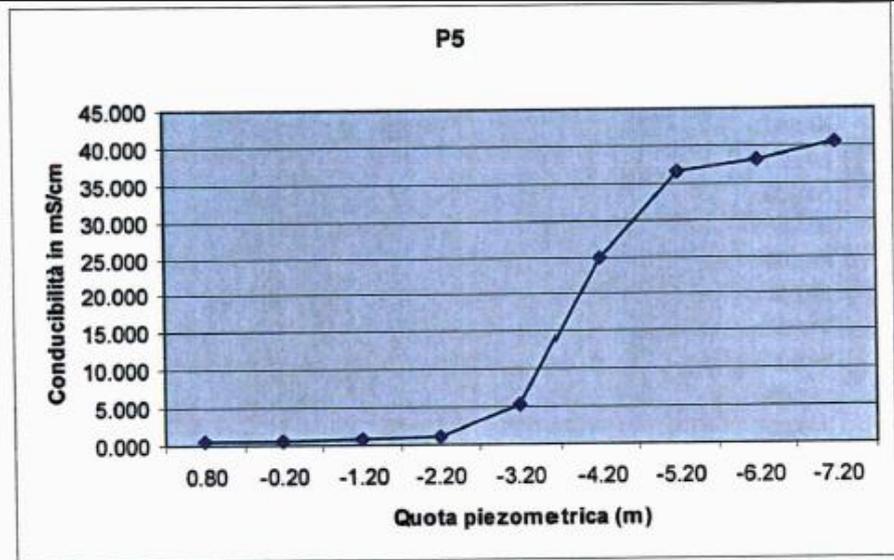
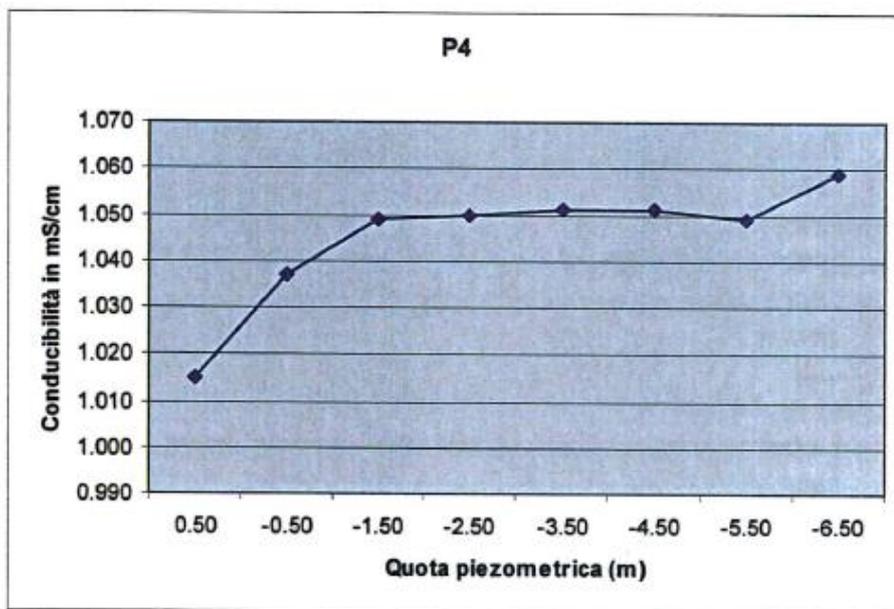
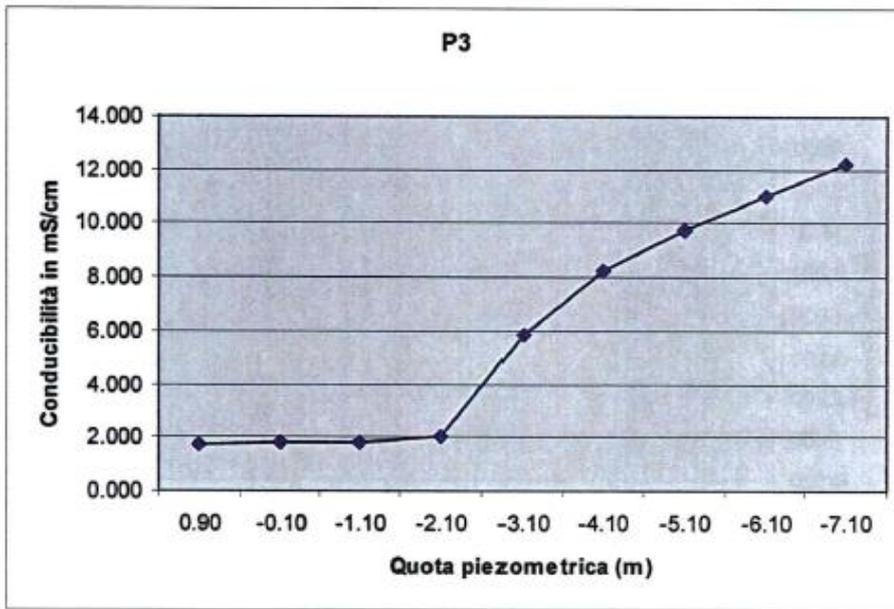
Figura 38 – Sondaggi P3, P4 e P5 condotti nel presente studio sovrapposti alla sezione geologica G di riferimento per lo studio modellistico.

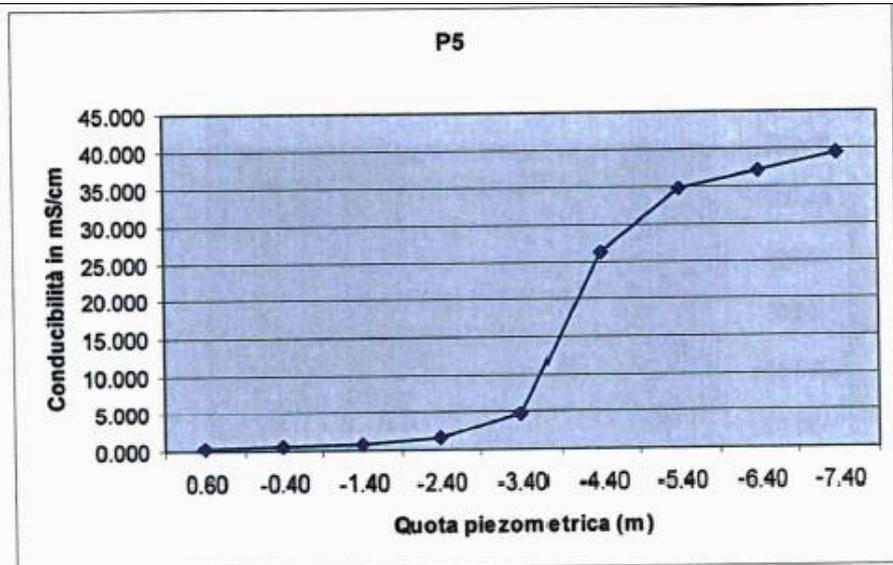
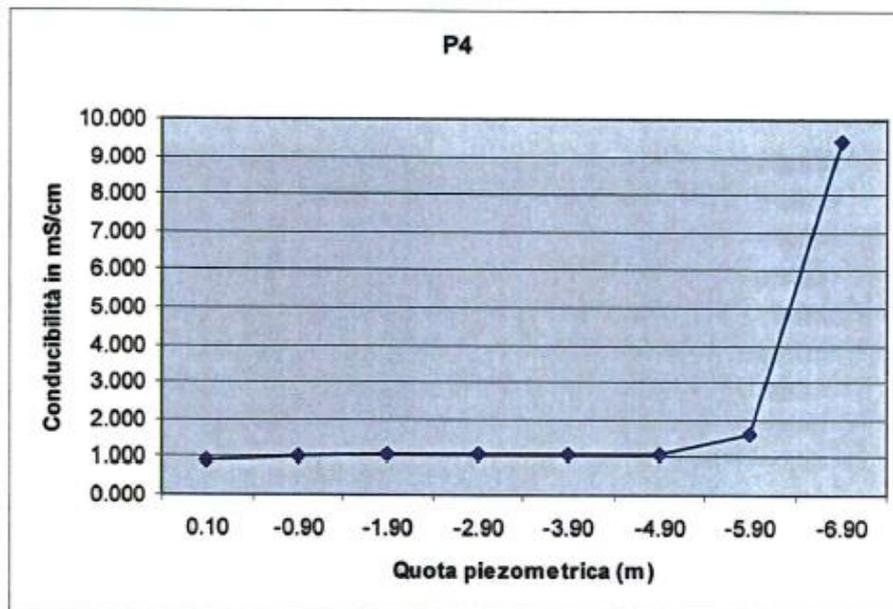
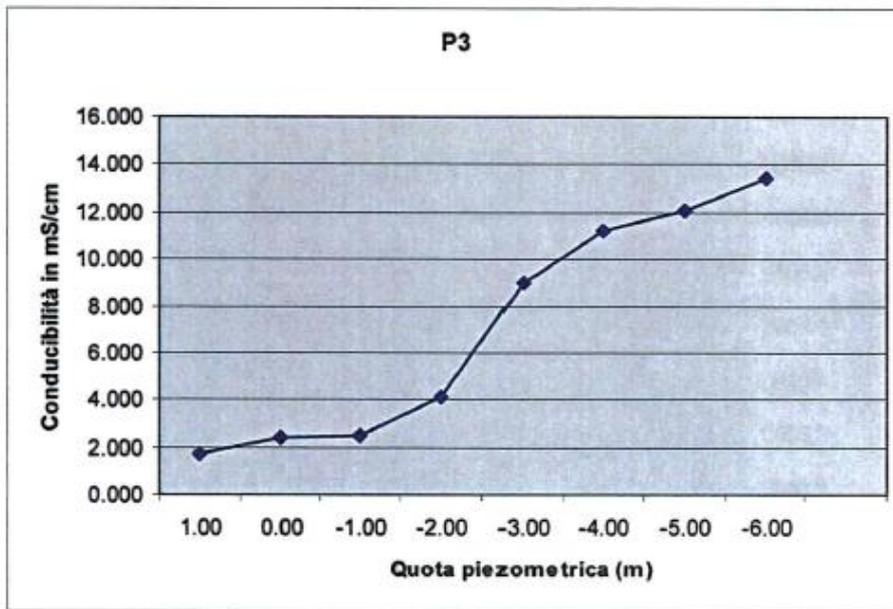
Da un confronto tra la conducibilità nei piezometri P3, P4 e P5 in diversi momenti dell'anno si nota che la salinità, oltre ad aumentare con la profondità (in chiara dipendenza dalla maggiore densità dell'acqua salata rispetto a quella dolce) diminuisce, anche se non in modo lineare, nei piezometri dell'entroterra rispetto a quello in prossimità del fiume. Le caratteristiche stratigrafiche complesse ed i rapporti con il vicino canale immissario del Fiume Magra rendono la salinità di P3 sensibilmente maggiore di quella in P4 ma in questi due punti di campionamento nell'entroterra si ha sempre una salinità almeno di tre volte inferiore di quella rilevata nel piezometro vicino al fiume.

18/05/2010









Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T. (n° Colpi)	Probet Test kg/cmq	Van Test kg/cmq	Campioni	Metodo Penetrazione	Metodo Stabilizzaz.	Cass. Caricab.	Falda
		Asfalto	0.00									
		Limo sabbioso	0.20									
		Ghiaia medio-grossa	0.55									
1		limo sabbioso compatto										
		sabbia fine con resti di laterizio										
2		limo sabbioso e sabbia	2.00									2.20
		fine con inclusi lapidei arrotondati (diam. max = 1 cm)	2.50									
		sabbia fine grigia	3.00		1-6-8							
3		sabbia con limo di colore grigio	3.30		3.00 PC							
		sabbia grigia										
4		ghiaia in matrice sabbiosa di colore grigio (diam. max = 6 cm, diam. medio = 1,5/2,0)										
5											1	
6			6.20								5.00	
		sabbia medio-grossa di colore grigio (manovra persea)										
7			7.20									
		ghiaia in matrice sabbiosa di color grigio										
8												
9		sabbia medio-grossa di color grigio	9.00									
			9.40									
10		ghiaia e sabbia di color grigio									2	
			10.60		5-6-7						10.00	
11		sabbia grossa color grigio con liveletti di limo e limo sabbioso (livelli tra 10,50 e 10,60 m, tra 11,90 e 12,00 m, tra 13,10 e 13,30 m e tra 13,40 e 13,50 m)			10.50 PC							
12												
13			13.50		7-8-10					(RM)		
		sabbia grossa color grigio			13.50 PC							
14										13.50		
15			15.00						(CS)		3	
									15.00		15.00	

Carotaggio S1 di **Bibi S.r.l.** del 29/08/2013 (da 0 a -15 m) effettuato in prossimità del fiume, in corrispondenza all'area di scavo del progetto.

Profondità		Descrizione
da (m)	a (m)	
0,00	0,55	Riporto costituito da asfalto e sottofondo ghiaioso e sabbio-limoso con resti di laterizio sul fondo
0,55	2,00	Limo sabbioso e sabbia fine con inclusi lapidei arrotondati (diam. max = 1,0 cm)
2,00	3,30	Sabbia limosa e sabbia di color grigio
3,30	10,60	Ghiaia in matrice sabbiosa con intercalazioni sabbiose di colore grigio
10,60	15,00	Sabbia medio-grossa con ciottoli di colore grigio

Tab. 2 – Stratigrafia semplificativa del sondaggio eseguito

Il modello

È stato costruito un modello al fine di simulare gli effetti sull'acquifero della realizzazione del progetto. Il modello tridimensionale è stato sviluppato utilizzando il programma della Simcore Software 'Processing Modflow X versione 10.0.18' che permette di integrare i moduli di trasporto di acque sotterranee MT3DMS, MT3D-USGS, e SEAWAT.

Il codice MODFLOW è un codice tridimensionale che risolve l'equazione di flusso nei mezzi porosi saturi. Il codice ha una struttura modulare e utilizza, con un procedimento iterativo, l'approssimazione numerica delle differenze finite.

Il programma è costituito da un modulo principale, il MAIN, e da pacchetti aggiuntivi, i PACKAGES, che servono per simulare le condizioni al contorno o particolari caratteristiche del sistema, come per esempio: la presenza di pozzi, fiumi, dreni e qualsiasi altro tipo di scambio di portata tra l'acquifero e l'esterno. L'equazione generale che governa il flusso idrico negli acquiferi confinati e che viene risolta dal modello è la seguente:

$$\frac{d\left(Kx * \frac{dh}{dx}\right)}{dx} + \frac{d\left(Ky * \frac{dh}{dy}\right)}{dy} + \frac{d\left(Kz * \frac{dh}{dz}\right)}{dz} - W = Ss * dh/dt$$

Dove:

- Kx, Ky, Kz sono la conducibilità idraulica lungo gli assi cartesiani x, y e z;
- h è il carico potenziometrico;
- W è il flusso in ingresso e/o uscita;
- Ss è l'immagazzinamento specifico;
- t il tempo.

Il programma usa uno schema di calcolo analitico tridimensionale. Esso consente di visualizzare l'andamento del campo di moto tridimensionale di un acquifero (Pollock, 1994).

Il primo passo per l'applicazione del codice consiste nella discretizzazione del dominio di interesse con una griglia di forma rettangolare o quadrata in cui vengono scelti dall'utente il numero di righe, di colonne e la dimensione delle celle. Le celle, di forma quadrata o rettangolare in pianta, diventano celle di forma cubica o parallelepipedica nello spazio. MODFLOW utilizza l'approssimazione alle differenze finite per trovare una soluzione all'equazione del flusso al centro di ciascuna cella della griglia di discretizzazione (block centered).

Partendo dalle condizioni attuali nell'intorno dell'area di progetto è stato definito un dominio di modellazione a pianta quadrata di 800 x 800 m con una fascia occidentale che rappresenta il fiume Magra. Il dominio spaziale dell'area è stato discretizzato con una griglia tridimensionale a passo orizzontale (x e y) costante di 20 m, costituita da 40 righe e 40 colonne.

La discretizzazione verticale prevede la suddivisione in vari strati, o layers, e la conseguente definizione, per ognuno di essi, delle superfici che li delimitano inferiormente (bottom) e superiormente (top). Nel nostro caso la discretizzazione verticale ha previsto l'individuazione di 3 layers che rappresentano i limiti delle interfacce che sono utili alla ricostruzione del modello che riproduce le condizioni attuali e quelle delle condizioni di progetto. I layer hanno uno spessore di 4 m, 6 m e 10 m. Per ogni strato sono state definite le superfici di tetto e di letto e le caratteristiche idrogeologiche derivate dalle sezioni e dalle stratigrafie disponibili nell'intorno dell'area. La superficie di letto di ciascuno strato corrisponde alla superficie di tetto dello stato sottostante, per cui complessivamente sono state ricostruite 4 superfici. Con questa tecnica è stata ricostruita la geometria tridimensionale dell'intero sistema, che complessivamente è rappresentata da 4800 celle. Tutti gli strati ricostruiti sono continui e non subiscono interruzioni. Le quote ricostruite vanno da +1 m, la quota del top del primo layer, a -19 m, il bottom del terzo layer, per un complessivo spessore del modello pari a 20 m.

Le simulazioni oggetto del presente lavoro sono state implementate tutte allo stato stazionario per cui non è stato necessario discretizzare la variabile tempo.

Per creare un modello di flusso allo stato stazionario è necessario definire le proprietà fisiche dei layers (top, bottom e conducibilità idraulica) e inserire le condizioni al contorno. Le condizioni non variano durante la simulazione e quindi si produce un'unica distribuzione di carico idraulico.

Le caratteristiche fisiche assegnate hanno mediato i valori della zona dato che i depositi di pianura alluvionale hanno creato una variabilità puntuale della stratigrafia il cui dettaglio è riproducibile ad un livello di dettaglio molto maggiore dello scopo della presente simulazione. Dato che i terreni variano da ghiaie a matrice siltosa ad argille e argille siltose, sono state assunte le caratteristiche di un silt che media le caratteristiche delle diverse litologie presenti.

Di seguito sono mostrate le caratteristiche di una cella del primo layer:

Aquifer Parameters at [1, 18, 10]	
IBOUND (flow) [-]	1 (variable-head)
ICBUND (transport) [-]	1 (variable-concentration)
Top of Layer [L]	1
Bottom of Layer [L]	-4
Starting Head [L]	0.3
Horizontal K [L/T]	1E-6 0
Vertical K [L/T]	1E-7 0
Effective Porosity [-]	0.21
Bulk Density [M/L ³]	2000

Ogni cella della griglia ha un valore di IBOUND che definisce se il tipo di cella ha carico idraulico costante, inattivo o variabile. Un valore negativo indica che la cella ha carico idraulico costante, un valore nullo indica che la cella è inattiva (non c'è flusso) e un valore positivo indica che la cella ha un carico idraulico variabile. Nel nostro modello al fiume è stato assegnato un carico costante (quota + 0.5 m), ai margini del modello perpendicolari al fiume è stata assegnata inattività mentre al margine occidentale dell'area di simulazione un carico costante di -0.5 m a simulare le condizioni più critiche per quanto riguarda l'apporto di acqua ad elevata salinità, che sono quelle estive, di apporto di acqua fluviale nella falda acquifera superficiale. Queste condizioni riproducono le condizioni di carico idraulico estivo come risulta dalle misure piezometriche (m slm) svolte a settembre. Alle celle intermedie è stato assegnato un valore iniziale arbitrario di *Hydraulic Head* di + 0.3 m variabile, il cui valore di modello risulterà al termine della simulazione.

Le condizioni post-operam nel modello sono state simulate replicando le caratteristiche assegnate al fiume in un'area circa corrispondente a quella che sarà l'area di scavo. Quest'area è stata posta in continuità con il fiume dato che la comunicazione con esso sarà data dallo scambio sia naturale che forzato dagli impianti preposti ad evitare la stagnazione delle acque del nuovo bacino. Attorno all'area del bacino di progetto è stata simulata la presenza della barriera costituita dalle palancole fino alla profondità del bottom del secondo layer cioè 9 m.

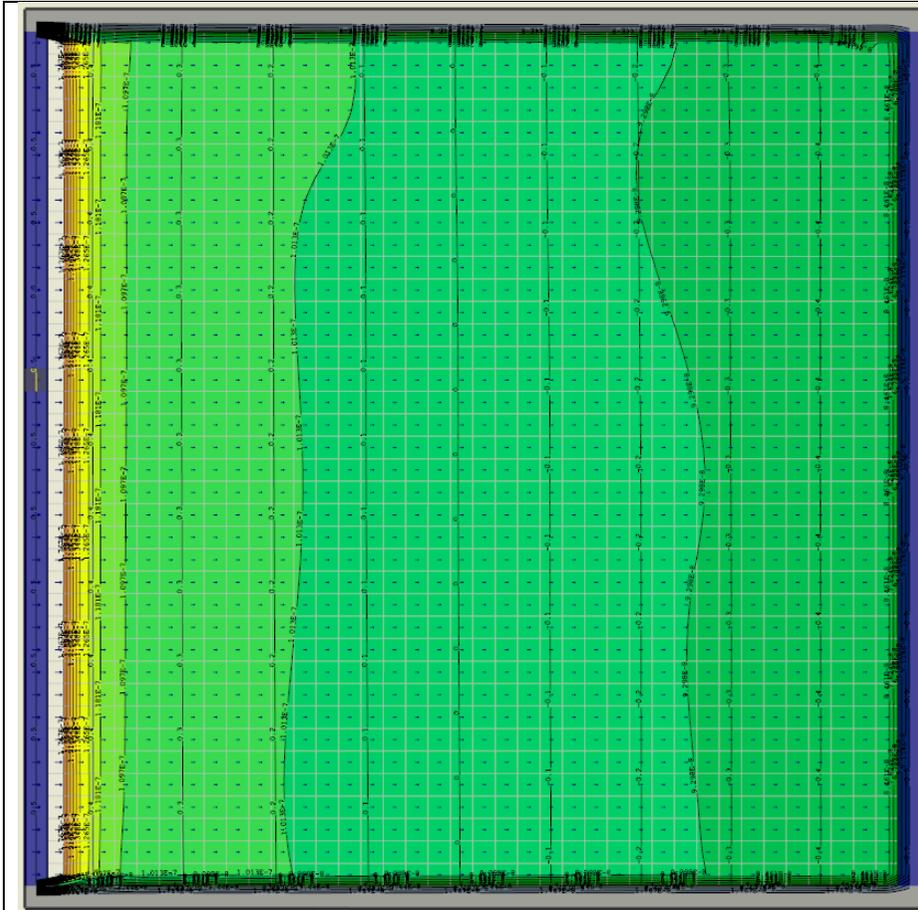
Entrambi gli scenari, ante e post operam, che riproducono la condizione estiva, sono stati protratti cautelativamente per circa 8 mesi (20.7×10^6 s).

Risultati

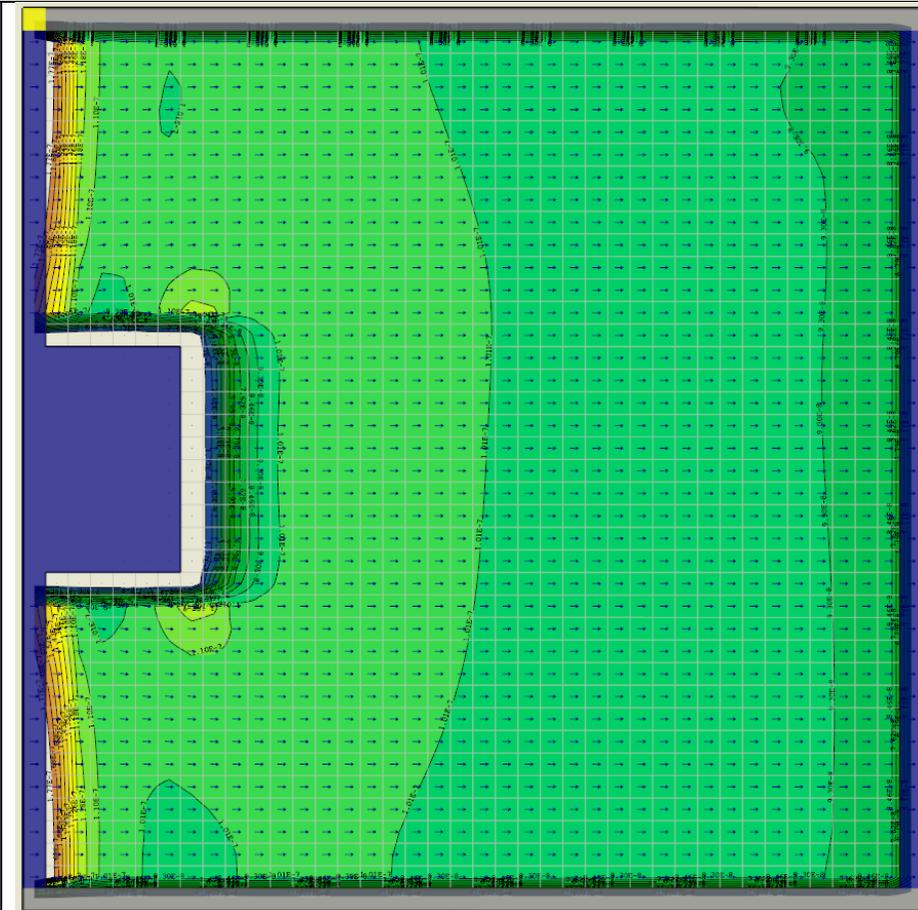
Sono di seguito riportati i risultati in forma grafica. Essi permettono di confrontare immediatamente i due scenari relativamente ai tre layer visti in pianta e a due sezioni 'est-ovest' poste, una in corrispondenza del bacino di progetto e l'altra in posizione intermedia tra esso ed il margine dell'area di simulazione. Il parametro che permette di valutare le differenze tra i due scenari è quello dei flussi orizzontali alle diverse quote. Nella condizione ante operam i flussi orizzontali, responsabili dell'avanzata del cuneo salino, sono massimi nell'immediato intorno del

fiume ed in profondità, a pochi metri dalla verticale del margine del fiume stesso. Nello scenario post operam i flussi orizzontali perdono gli alti valori che si avevano attorno al fiume per la presenza del bacino. Al di sotto di esso subiscono un incremento e successivamente una diminuzione in corrispondenza della barriera rappresentata dalla palancolatura. Al di sotto di essa infatti le curve di medesimo flusso subiscono un notevole abbassamento, in particolare quelle relative ai valori di flusso che nella condizione ante operam si trovavano in prossimità della superficie. Spostandosi dal margine del bacino verso l'entroterra i flussi superficiali continuano ad essere diminuiti dalla presenza della barriera rispetto all'ante operam fino a raggiungere gli stessi valori dopo circa 80 m (4 celle) dopo la barriera stessa. I valori oltre questa distanza, allontanandosi dal fiume, diminuiscono in entrambi gli scenari, più rapidamente nello scenario post operam, fino ad assumere sostanzialmente gli stessi valori.

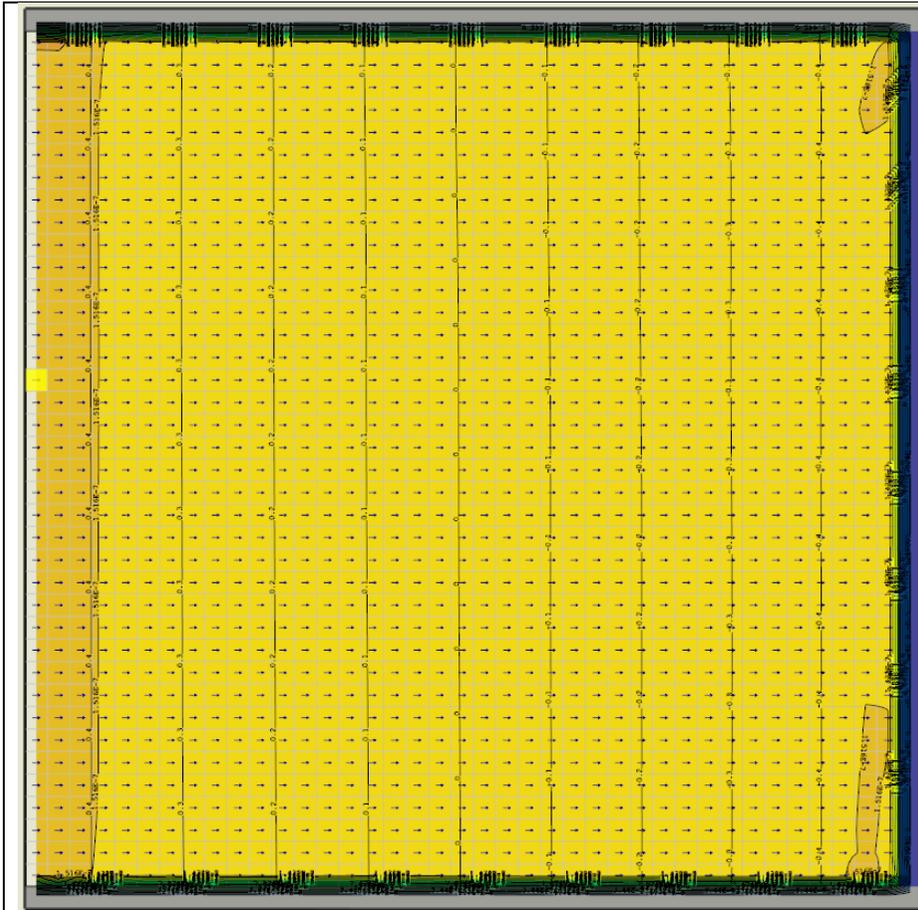
Nelle sezioni intermedie tra il bacino e il margine di simulazione i flussi appaiono rallentati dalla presenza del complesso bacino-barriera in quanto i medesimi valori di flusso si trovano a profondità maggiori rispetto allo scenario ante operam.



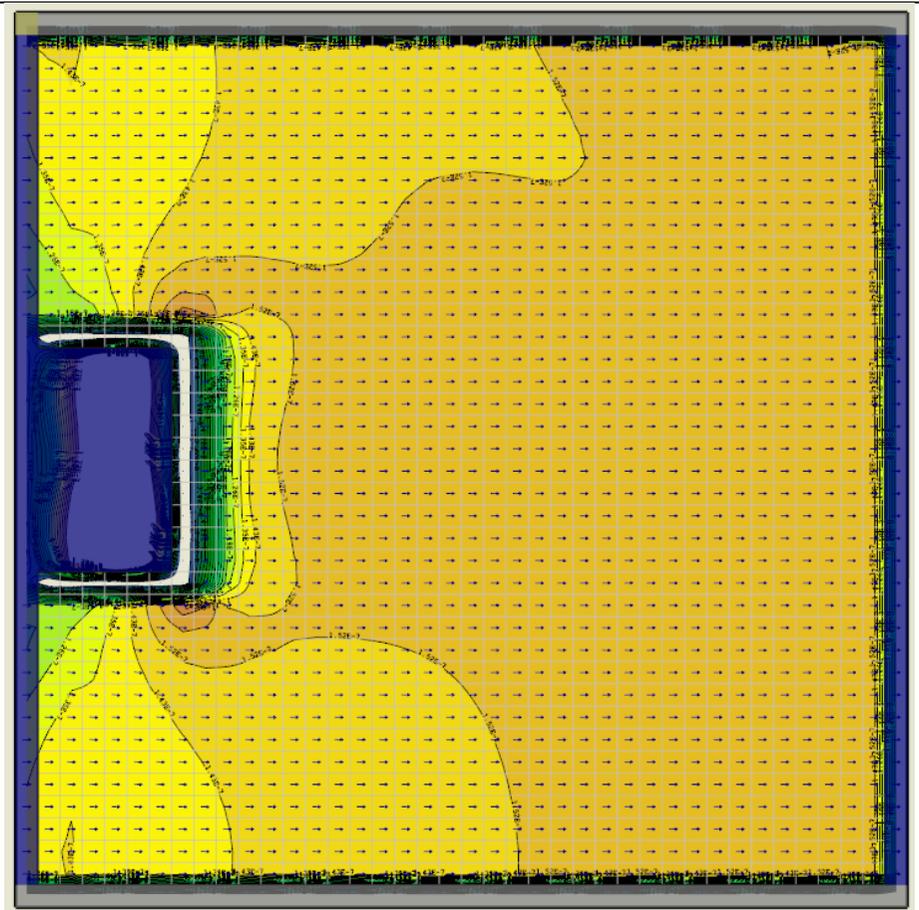
Ante operam – Layer 1



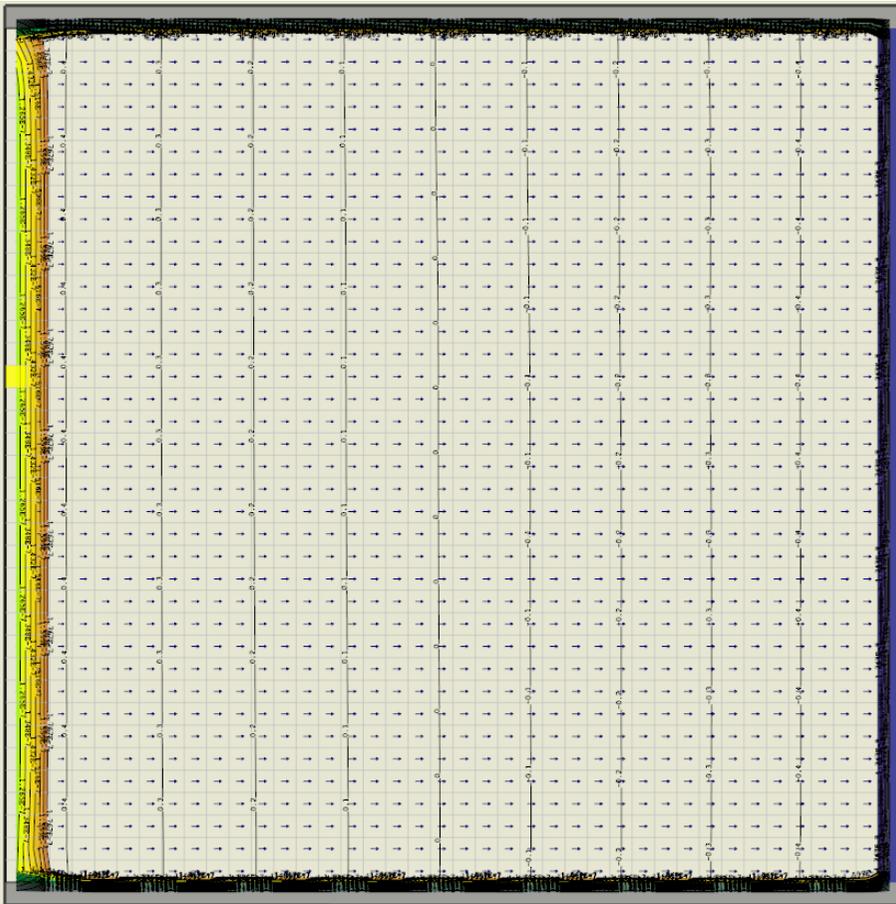
Post operam – Layer 1



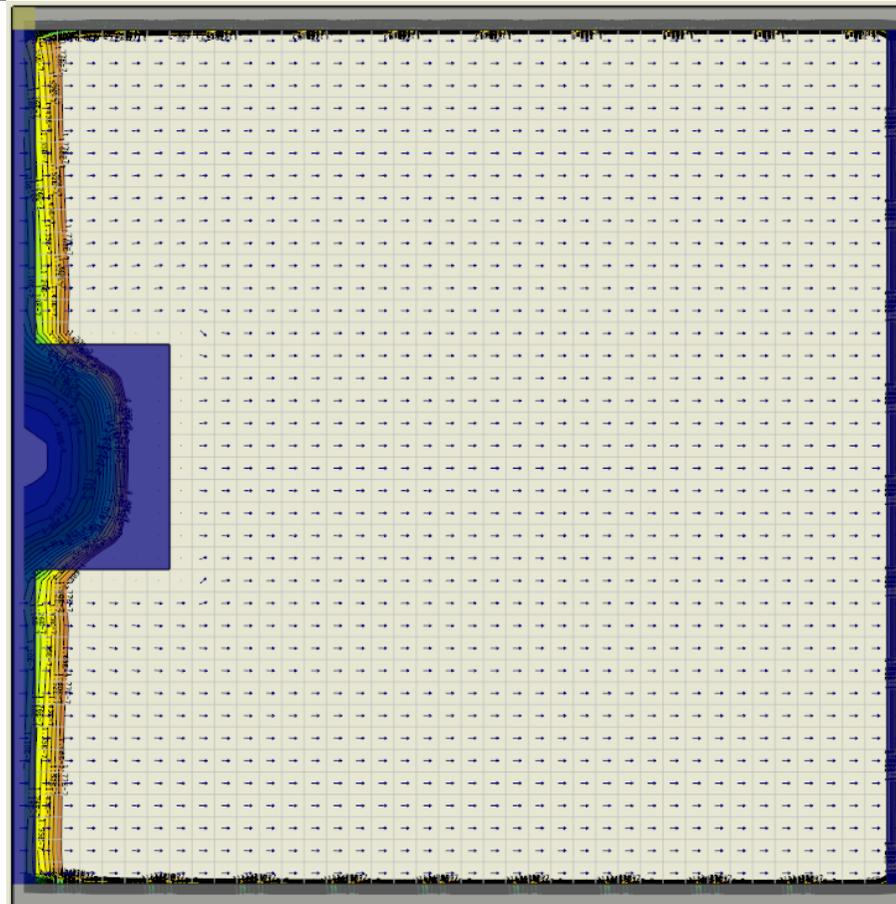
Ante operam – Layer 2



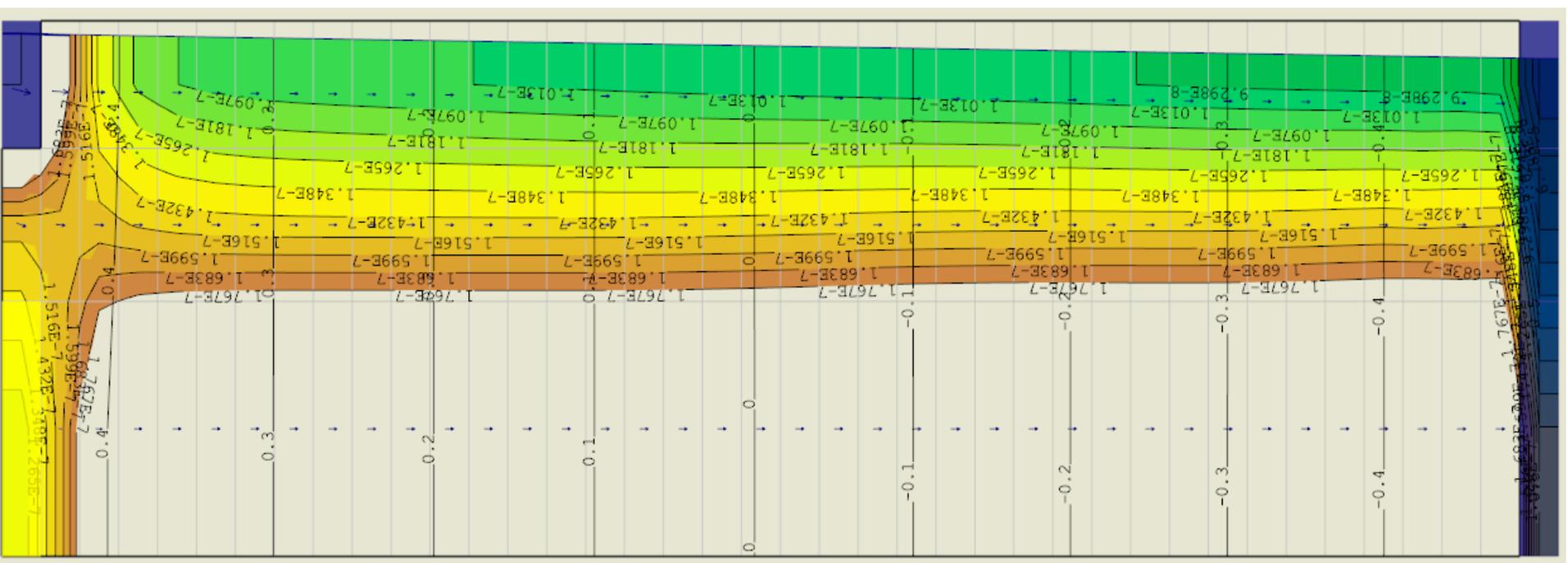
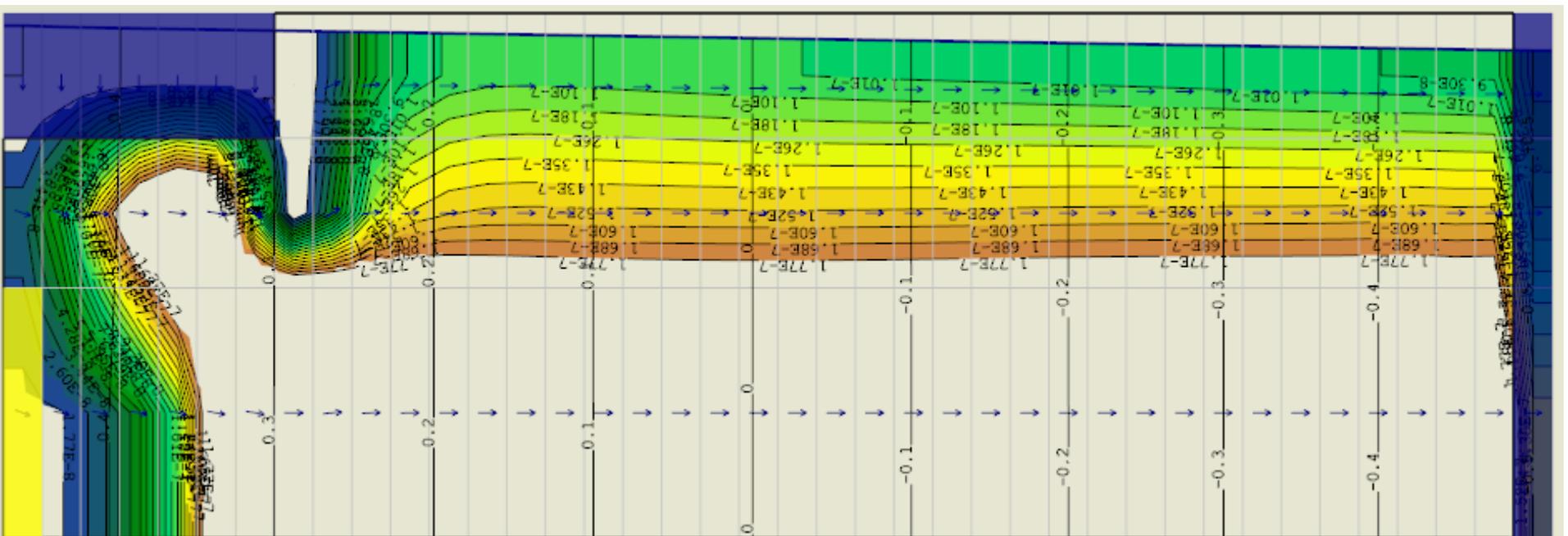
Post operam – Layer 2

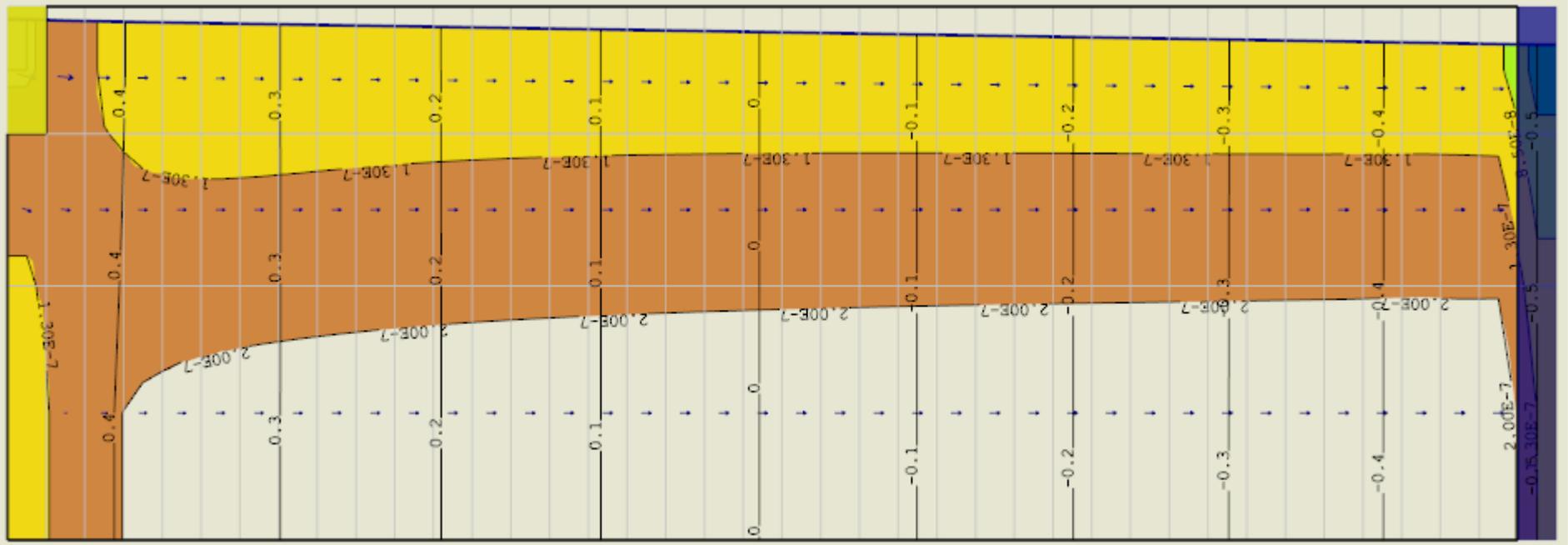
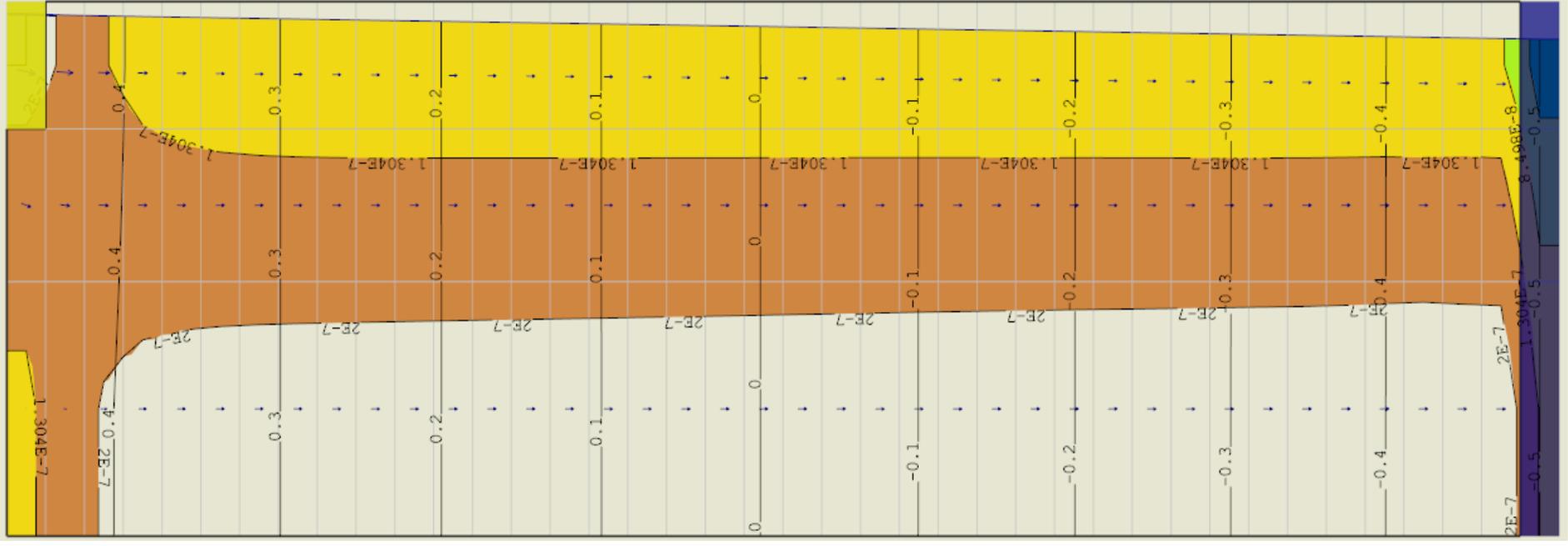


Ante operam – Layer 3



Post operam – Layer 3





Discussione e conclusioni

Nel modello si dimostra come in una condizione estiva e di omogeneità delle litologie mediate tra quelle riscontrate nell'area di progetto, le condizioni ante e post operam siano mutate solo localmente in prossimità del fiume, con un sostanziale riequilibrio aumentando la distanza dal fiume stesso.

Le misure di conducibilità sul campo dimostrano inoltre come siano più le situazioni stratigrafiche locali ed i rapporti con l'idrografia a condizionare la presenza del cuneo salino infatti, nell'entroterra argilloso, sarà la presenza di una lente di ghiaia che è in connessione con il fiume ad aumentare il livello di salinità; ad esempio i valori di conducibilità in P4, che presenta uno strato di ghiaia a 10 m al di sotto di un altro di limo argilloso, mostrano spesso picchi di conducibilità sulla misura più profonda a 7 m circa dal p.c.. Inoltre le litologie più grossolane che si riscontrano lungo il fiume (vd sondaggio P5 ed S1) sono in maggiore continuità con il fiume rispetto al modello e le modifiche post operam previste per la circolazione sotterranea, localizzate nell'intorno dell'opera, saranno realisticamente molto ridotte rispetto al modello stesso.

In conclusione

- il modello non prevede modifiche sostanziali alla circolazione delle acque se non nelle immediate vicinanze dell'opera stessa e
- le differenze di litologia tra l'area lungo il fiume e l'entroterra rafforzano quanto previsto dal modello.

Questo permette di asserire che nell'entroterra non ci saranno differenze tra le condizioni ante operam e quelle post operam.