

**Comune di Ameglia
Provincia della Spezia**

**Realizzazione di una Marina (Darsena) scavata
a secco in proprietà privata in sponda sinistra
del fiume Magra,
Comune di Ameglia (SP).**

STUDIO IDROGEOLOGICO

Sestri Levante, 07 Ottobre 2022

Dott. Geol. Giovanni Debellis

Iscr. Albo Geologi prov. Genova n. 592



1. PREMESSE	3
1.1 INCARICO E UBICAZIONE	3
1.2 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI	3
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	4
3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO DI AMBITO	5
4. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DI AMBITO	6
4.1 LA SUPERFICIE PIEZOMETRICA	6
4.2 IL "CUNEO SALINO"	7
5. SIMULAZIONI NUMERICHE PREGRESSE	7
6. MODELLO IDROGEOLOGICO	8
6.1 CONSIDERAZIONI GENERALI	8
6.2 SET-UP INIZIALE	9
6.3 RISULTATI	12
6.3.1 SCENARIO ANTE-OPERAM VS POST-OPERAM CON SCOGLIERE	12
6.3.2 SCENARIO POST-OPERAM CON PALANCOLE VS POST-OPERAM CON SCOGLIERE	18
7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	22

ELENCO ALLEGATI

Allegato 1. Immagini e tabelle tratte dal lavoro Grassi e Curzio (2018).

1. PREMESSE

1.1 Incarico e ubicazione

Lo scrivente dott. Geol. Giovanni Debellis, con studio tecnico in Sestri Levante (GE) alla via Antica Romana Occ.le n. 3/4 ed iscritto al n. 592 dell'Albo dei Geologi della Liguria – provincia di Genova, riporta di seguito lo studio idrogeologico a corredo del progetto di una Marina (Darsena), in un'area di proprietà privata in sponda sinistra del fiume Magra, nel Comune di Ameglia (SP). Tale studio è stato reso necessario a seguito dell'aggiornamento progettuale valutato in ottemperanza alle indicazioni di cui al parere n. 562 del 12/09/2022 della Commissione Tecnica di Verifica dell'Impatto Ambientale – VIA e VAS del Ministero della Transizione Ecologica, che ha previsto l'inserimento, a tergo della scogliera, di teli in HDPE a coprire il perimetro dello scavo, quale modifica alla scogliera con solo telo in geotessuto ed in sostituzione della barriera di palancole intorno alla superficie di scavo.

Le risultanze di tale studio saranno confrontate con le informazioni ricavate da simulazioni numeriche svolte nel Novembre 2018 (Grassi e Curzio, 2018), basate sulla precedente proposta progettuale, già corredata da Parere Favorevole di Compatibilità Ambientale n. 3308 del 17 aprile 2020 da parte della Commissione Tecnica di Verifica per l'Impatto Ambientale – VIA e VAS.

Nel prosieguo saranno esposte le risultanze del presente studio, basato sulla realizzazione di un modello idrogeologico 3D di tipo numerico che si pone come fine la valutazione della potenziale intrusione del cuneo salino nella piana del fiume Magra, nei settori prossimi al sito di realizzazione della Darsena e nell'immediato entroterra. Le informazioni geologiche e idrogeologiche necessarie per il *run* delle simulazioni sono state desunte da ricerche bibliografiche.

1.2 Descrizione degli interventi

L'opera oggetto del presente approfondimento idrogeologico prevede la realizzazione di una Marina scavata a secco in ambito di proprietà privata, con accesso al Fiume Magra mediante un canale artificiale avente funzione di alimentazione ed in grado di regolare il flusso ed il deflusso delle acque all'interno della darsena. L'opera non prevede alcuna modificazione strutturale del fiume stesso.

Dal punto di vista tecnico-operativo, si prevede, come prima fase, l'esecuzione delle attività di scavo confinate all'interno del lotto di proprietà. A seguito di queste, l'emersione dei livelli di falda genererà la formazione di un bacino artificiale contenuto a perimetro da scogliere; **la superficie del perimetro di scavo verrà ricoperta da teli impermeabili in HDPE**; queste opere vengono predisposte in sostituzione del palancole originariamente considerato e questo studio ne dimostra l'equivalente efficacia.

In ultimo, la successiva realizzazione del canale artificiale permetterà il collegamento diretto con le acque del Fiume Magra.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il sito presso la quale è prevista la realizzazione della nuova Darsena si trova in località Fiumaretta, nel Comune di Ameglia (SP), in sponda sinistra del fiume Magra, a circa un chilometro dalla sua foce.

L'area è reperibile, in particolare, in corrispondenza delle seguenti coordinate (baricentro dell'area, sistema di riferimento Gauss Boaga):

- Longitudine: 9.97993 E
- Latitudine: 44.05664 N

Dal punto di vista corografico, essa è localizzata nel settore centro-orientale del Foglio C.T.R. n° 248120.

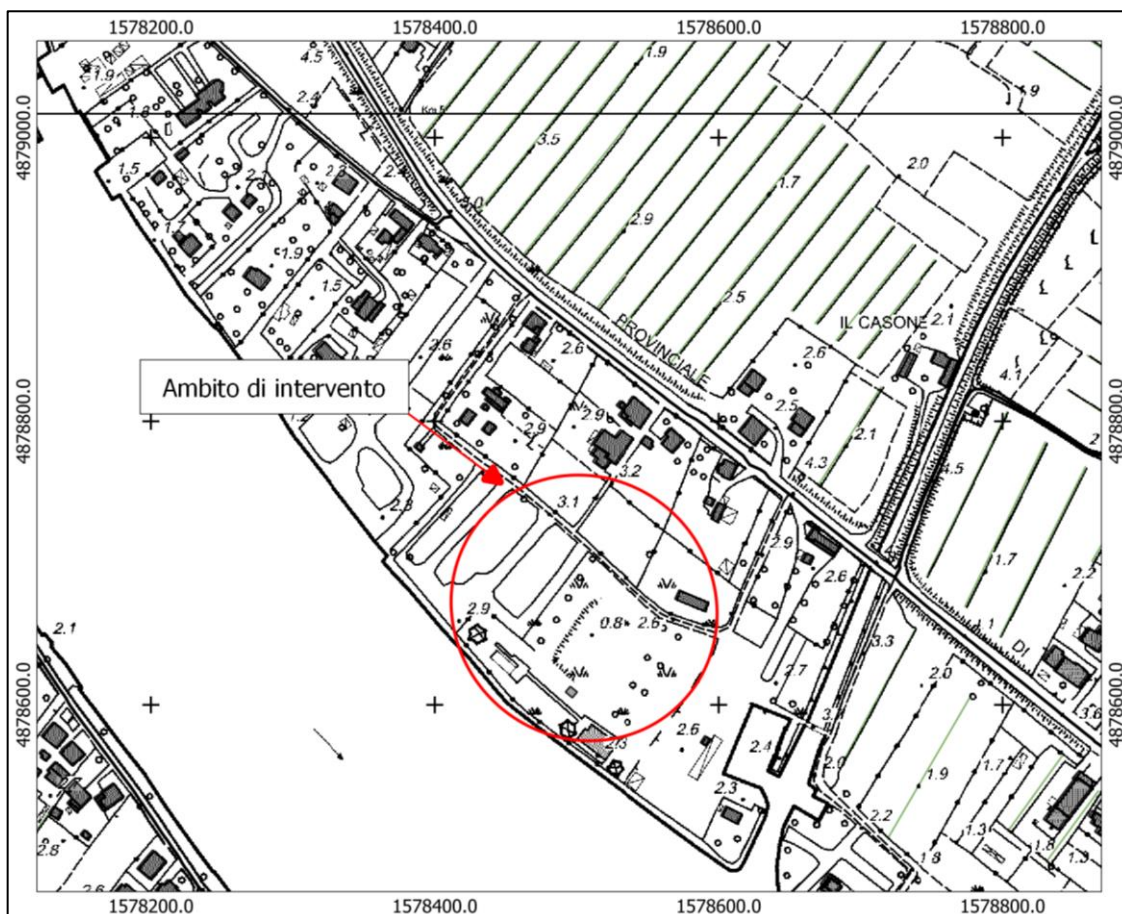


Figura 1. Inquadramento cartografico con localizzazione del sito in oggetto (Carta Tecnica Regionale - Scala 1:5.000. Sistema di riferimento Gauss Boaga).

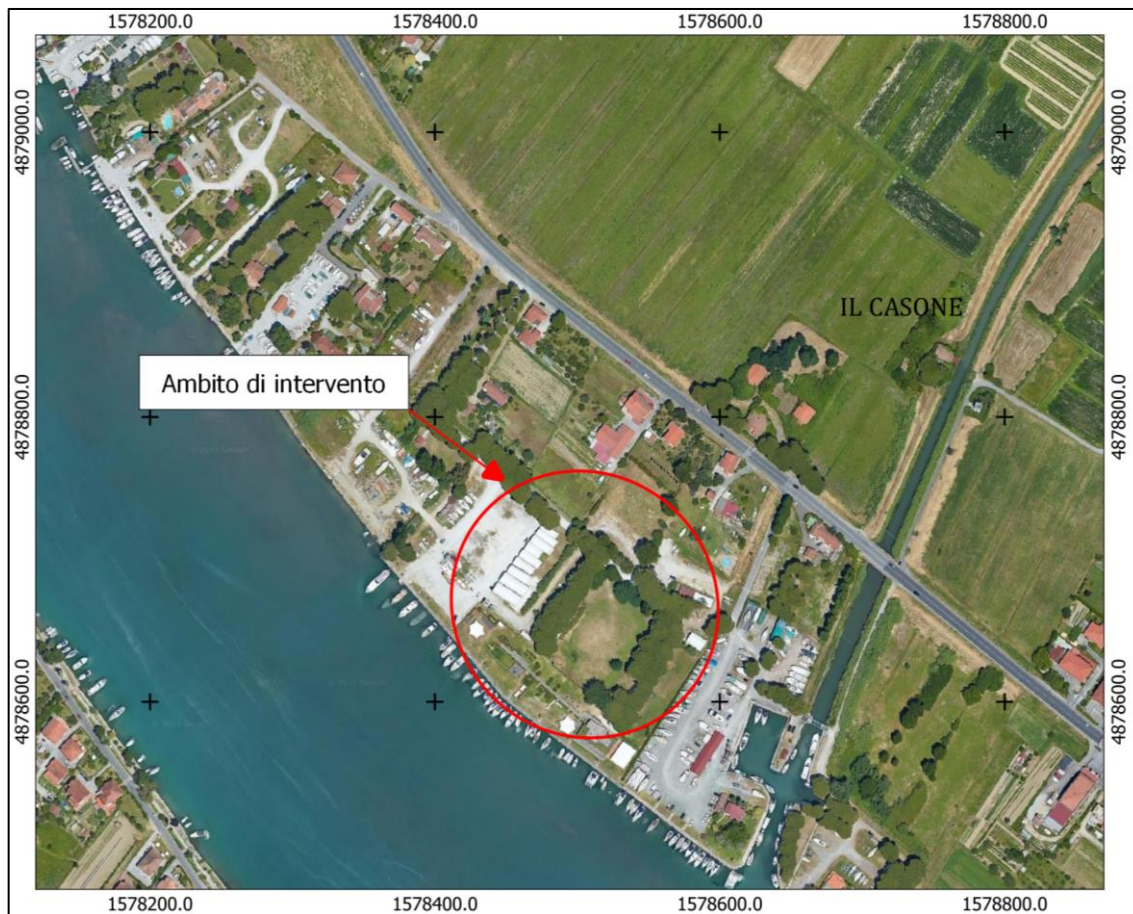


Figura 2. Inquadramento su base ortofotografica con indicazione dell'area in studio (Fonte GoogleShapes, Scala 1:5.000; Sistema di Riferimento Gauss Boaga).

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO DI AMBITO

Per quanto concerne l'assetto geologico-geomorfologico, il sito interessato dal progetto è localizzato sulla piana alluvionale del Fiume Magra, in sponda orografica sinistra, ed insiste su terreni caratterizzati dalla presenza di depositi alluvionali terrazzati di età Olocenica, costituiti prevalentemente da ghiaie, sabbie e limi. In particolare, il terrazzo fluviale che verrà interessato dall'opera a progetto è di "ordine 1", cioè di età più recente tra quelli presenti nell'area vasta. Il terrazzo fluviale risulta separato dai depositi alluvionali attuali del Fiume Magra, soggetti alle dinamiche evolutive tipiche degli ordinari processi fluviali, dal ciglio di terrazzo che delimita la sponda fluviale.

Alcuni sondaggi geognostici svolti nell'anno 2010 hanno evidenziato come, nel sottosuolo dell'areale intorno al sito di scavo, prevalgano rispettivamente sedimenti argilloso-siltosi (sondaggi P3 e P4) e granulometrie più grossolane nella classe delle sabbie (P5) (Allegato 1 – Figure 1A).

Un sondaggio geognostico (S1) svolto dalla società Bibi S.r.l. in data 29/08/2013, presso il sito di interesse, evidenzia in generale la presenza di granulometrie sabbiose-ghiaiose, intervallate a livelli più marcatamente limosi (0,5-2 m da piano campagna) (Allegato 1 – Figure 2A, 3A).

4. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DI AMBITO

Le indagini eseguite nell'area vasta hanno evidenziato la presenza, negli orizzonti più superficiali del sottosuolo, di una falda freatica, la cui quota varia marcatamente durante l'anno ed è strettamente funzione dell'intensità delle precipitazioni che cadono sul bacino del fiume Magra.

4.1 La superficie piezometrica

La variazione della quota della superficie piezometrica e le portate del Fiume Magra dipendono direttamente dalle precipitazioni della zona, generalmente molto ridotte nei mesi estivi (Grassi e Curzio, 2018).

Per inquadrare la variazione della quota piezometrica nel sito dov'è situata l'opera a progetto, sono state prese in considerazione informazioni ricavate da diverse fonti tra cui:

- letture effettuate negli anni 2010-2011 in piezometri già installati in loco denominati P5, P4 e P3 (Grassi e Curzio, 2018). Questi piezometri sono allineati a distanze crescenti dal fiume, posti rispettivamente a circa 160 m, 330 m e 660 m dal fiume (Allegato 1 – Figura 1A);
- **letture effettuate nel 2020 in un piezometro installato nell'area di studio**, le quali individuano la soggiacenza della falda a -2,20 m da piano campagna (Frediani, 2020), e quindi a profondità paragonabili a quelle delle letture del 2010-2011.

Tali valori di soggiacenza sono stati confermati da dati tratti dalla bibliografia (es. Carra – Provincia della Spezia, 2011 e Atlante degli Acquiferi della Liguria – Volume IV: l'acquifero alluvionale della bassa valle del Fiume Magra, Seconda Edizione Elettronica del 2020) e da letture svolte nel Settembre 2022 nel piezometro presente nella proprietà della committenza.

In particolare, è interessante notare come sia emerso che nei mesi piovosi la quota della falda sia generalmente maggiore nell'entroterra rispetto al lungofiume ($P3 > P4 > P5$); nei mesi di magra, invece, le quote piezometriche sono maggiori in prossimità del fiume ($P5 > P4 > P3$).

4.2 Il “cuneo salino”

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 (Grassi e Curzio, 2018).

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 per mille), che equivalgono a 35 PSU (Practical Salinity Units) e 42.9 mS/cm (Grassi e Curzio, 2018).

La media triennale della salinità del fiume Magra, misurata presso il ponte di Colombiera (stazione MAMA 09), è 12.4 PSU con un range compreso tra 0.2 e 36.1 PSU; l’ampia variabilità risulta funzione delle portate del fiume. Nella stazione MAMA08 (loc. Camisano - a monte della stazione MAMA09), il valore medio su base triennale è di 6.6 PSU con un range compreso tra 0.1 e 25 PSU. In generale le acque del fiume Magra presso le due stazioni di misura possono essere classificate come mesoaline, seppur con una variabilità pronunciata e solamente nei mesi tardo-estivi le acque possono essere classificate eurialine; nei periodi primaverili, autunnali e invernali, i valori di salinità tendono infatti a diminuire, grazie a un apporto fluviale maggiore ed a precipitazioni atmosferiche più abbondanti rispetto alla stagione estiva.

Come evidenziato dalle Figure 4A e 5A (Allegato 1) che riportano i valori di salinità rilevati durante le campagne del 2011 rispettivamente presso le stazioni MAMA 09 (ponte della Colombiera), e la stazione MAMA 08 (loc. Camisano) (Grassi e Curzio, 2018), il “cuneo salino” è 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 vs morbida-piena autunnale) e delle diverse situazioni di deflusso idrico stagionali (inverno vs estate), oltre che dalla vicinanza alla foce (MAMA09 vs MAMA08).

Da un confronto tra la conducibilità rilevata nelle acque dei piezometri P3, P4 e P5 (Grassi e Curzio, 2018) (Allegato 1 - Figure 7A-10A), 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.

5. SIMULAZIONI NUMERICHE PREGRESSE

Nel Novembre 2018, sono state elaborate alcune simulazioni numeriche 3D (Grassi e Curzio, 2018), utilizzando la versione 10.0.18 del software “Processing Modflow X”, che hanno riprodotto i processi agenti sulla falda freatica in un adeguato intorno dell’area interessata dalle opere a progetto.

Il progetto su cui sono state impostate le simulazioni prevedeva la presenza di una barriera costituita da palancole intorno alla superficie dello scavo della Darsena, che nei modelli è stata imposta fino alla profondità di 9 m.

Tali simulazioni hanno evidenziato come nella condizione estiva e nel caso di omogeneità delle litologie, mediate tra quelle riscontrate nell’area di progetto, le condizioni ante e post operam fossero

mutate solo localmente in prossimità del fiume, con un sostanziale riequilibrio aumentando la distanza dal fiume stesso.

Nello scenario post operam, i flussi orizzontali perdevano gli alti valori che si avevano attorno al fiume per la presenza del bacino. Al di sotto di esso subivano un incremento e successivamente una diminuzione in corrispondenza della barriera rappresentata dalla palancolatura.

Spostandosi dal margine del bacino verso l'entroterra i flussi superficiali continuavano ad essere diminuiti dalla presenza della barriera rispetto all'ante operam fino a raggiungere gli stessi valori dopo circa 80 m dopo la barriera stessa. I valori oltre questa distanza, allontanandosi dal fiume, diminuivano in entrambi gli scenari, più rapidamente nello scenario post operam, fino ad assumere sostanzialmente gli stessi valori.

6. MODELLO IDROGEOLOGICO

6.1 Considerazioni generali

Il modello numerico prodotto e descritto in questo lavoro è stato elaborato tramite il software "Processing Modflow X", un'interfaccia grafica che si basa sui codici di calcolo MODFLOW, sviluppati dalla USGS, pubblicati per la prima volta nel 1984 e progressivamente implementati. Questi codici, con struttura modulare, simulano in 3D il moto delle acque sotterranee ed il trasporto di soluti (MODular groundwater FLOW model) nei mezzi porosi e porosi equivalenti saturi; essi si basano sulla risoluzione delle equazioni che governano il flusso e la conservazione della massa utilizzando la tecnica delle differenze finite.

Nei modelli alle differenze finite al dominio fisico di interesse viene sovrapposto un grigliato regolare che lo divide in sottodomini di forma cubica o parallelepipedica (maglie). A ciascuna maglia della griglia viene attribuito un set di parametri descrittivi delle caratteristiche dell'acquifero e del sistema. Il modello calcola l'altezza piezometrica e la concentrazione dei soluti nei nodi del grigliato o al centro delle maglie (a seconda dello schema adottato).

Il codice numerico automaticamente:

- applica l'equazione di continuità a ciascuna maglia che contiene l'altezza piezometrica incognita nella maglia in esame e in quelle adiacenti;
- ottiene un set di n equazioni in n incognite;
- calcola la distribuzione delle altezze piezometriche risolvendo il sistema suddetto.

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.

6.2 Set-up iniziale

I modelli numerici 3D descritti nel presente studio si pongono come fine lo studio del potenziale ingresso del cuneo salino sia presso il sito oggetto di intervento sia in un suo intorno.

Nello specifico, sono stati simulati due modelli, il primo rappresentativo dello stato attuale o ante-operam, **il secondo basato sull'aggiornamento del progetto della nuova Darsena** (post-operam), che prevede l'inserimento di **scogliere** e l'utilizzo, sulle pareti dello scavo, **di teli di protezione in materiale HDPE**, considerando come area di interesse non solo quella adiacente alle opere a progetto ma anche di un suo adeguato intorno per evidenziare l'influenza delle opere sulla falda freatica anche nell'entroterra.

Tutti i modelli sono stati implementati discretizzando il dominio di interesse tramite una griglia a maglie quadrate regolari della dimensione, lungo x e y, di 20 m, disposte lungo 40 righe e 40 colonne. La griglia ha dimensioni totali di 800 m x 800 m (Figura 3).

La terza dimensione (z) è stata suddivisa in 3 strati o layers, ognuno caratterizzato da una superficie di top e una di bottom. Il modello consta quindi di un totale di 4800 celle. Ad ogni layer sono stati attribuiti i parametri morfologici e idrogeologici ricavati dalle indagini disponibili svolte nell'area di interesse e tratti da Grassi e Curzio (2018).

I layers hanno spessore costante rispettivamente di 4 m, 6 m e 10 m, partendo dallo strato più superficiale. 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 caratteristiche idrogeologiche assegnate alle singole celle hanno mediato i valori della zona, poiché 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. I terreni variano da ghiaie a matrice siltosa ad argille e argille siltose: sono state quindi assunte le caratteristiche di un silt che media le caratteristiche delle diverse litologie presenti.

In particolare sono stati assunti valori, uguali per tutti i layers, di conducibilità idraulica orizzontale pari a $1e-06$ m/s, conducibilità idraulica verticale pari a $1e-07$ m/s, porosità efficace pari a 0.21 e densità del mezzo pari a 2000 kg/m^3 .

Per ogni cella viene definito inoltre un valore di IBOUND che definisce se il tipo di cella ha carico idraulico costante (IBOUND=-1), inattivo in assenza di flusso (IBOUND=0) o variabile (IBOUND=1).

Nel presente modello è stato assegnato un carico costante ai margini destro e sinistro (Figura 3): presso il margine sinistro, coincidente con il settore orientale del fiume Magra adiacente alla sponda sinistra, è stato attribuito un carico costante pari a + 0.5 m. Il margine destro è caratterizzato da un carico pari a -0.5 m a simulare le condizioni più critiche per quanto riguarda l'apporto di acqua ad elevata salinità nella falda acquifera superficiale, così come evidenziato dalle misure piezometriche svolte al termine del periodo estivo e riportate nell'Allegato 1 – Figura 11A; nonostante i dati a cui si fa riferimento per la stima di quest'ultimo valore risalgano agli anni 2010-2011, si ritiene che, non essendo variate fino ad oggi le condizioni al contorno, questo valore possa essere considerato valido e quindi rappresentativo per ottenere una simulazione dello stato attuale della soggiacenza della falda nell'area di interesse.

I margini superiori ed inferiori sono automaticamente inattivi al flusso. Alle celle intermedie è stato assegnato un valore iniziale arbitrario di carico idraulico pari a + 0.3 m, valore che potrà variare durante la simulazione.

Nel modello rappresentante lo stato post-operam, attorno all'area del bacino di progetto è stata simulata la presenza di una barriera costituita da un telo impermeabile in HDPE fino alla profondità di 4 m (bottom del primo layer).

Le simulazioni oggetto del presente lavoro sono state implementate tutte allo stato stazionario per cui non è stato necessario discretizzare la variabile tempo. Nelle simulazioni allo stato stazionario i parametri impostati e le condizioni al contorno non variano durante la simulazione e si produce quindi un'unica distribuzione di carico idraulico. 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).



Figura 3. Set-up dei modelli in cui sono visibili la griglia del modello (piano x-y) e le condizioni al contorno (aree blu: IBOUND=-1 - constant head). a: stato attuale o ante-operam; b: stato di progetto o post-operam (presenza di scogliere e telo in HDPE intorno alla superficie di scavo).

6.3 Risultati

6.3.1 Scenario ante-operam vs post-operam con scogliere e teli in HDPE

I modelli numerici elaborati in questo lavoro hanno evidenziato che le modifiche apportate dalle opere a progetto, **considerando nello specifico la presenza di scogliere e teli impermeabili in HDPE** a bordare la superficie di scavo, rispetto all'attuale assetto delle aree adiacenti l'argine fluviale (ante-operam), **generano modeste variazioni sia dell'altezza della superficie piezometrica sia dei flussi orizzontali che interessano la falda freatica.**

Le oscillazioni maggiori di altezza piezometrica tra i due scenari (attuale e di progetto modificato mediante inserimento di scogliere con teli in HDPE) sono più evidenti in prossimità dei settori adiacenti al perimetro della nuova Darsena; in particolare presso il limite a monte della Darsena e quindi nelle aree più lontane dall'attuale argine del fiume (Figure 4 e 5), la superficie piezometrica risulterebbe circa 10 cm più alta nella configurazione di progetto (con scogliere e teli) rispetto allo scenario attuale. La differenza tra la quota della superficie piezometrica simulata nelle due situazioni diminuisce progressivamente procedendo verso l'entroterra e si annulla definitivamente a circa 500 m dal limite a monte della Darsena.

E' comunque importante notare come le differenze di altezza piezometrica tra gli scenari, nell'entroterra, siano minime, scendendo già a valori di 3-4 cm a circa 220 m dal ciglio settentrionale della Darsena.

Per quanto concerne i flussi orizzontali simulati, nella condizione ante-operam questi aumentano rapidamente nei settori adiacenti l'argine del fiume, procedendo dall'argine verso i settori interni, per mantenersi costanti per diverse centinaia di metri avanzando verso l'entroterra (Figura 6a).

Nello scenario di riproposizione progettuale, il gradiente orizzontale massimo di flusso è localizzato in prossimità del perimetro della Darsena; i flussi orizzontali superficiali sono massimi presso il limite più a monte della Darsena, nel suo settore centrale, ed equivalgono a meno del doppio di quelli registrati nello scenario ante-operam nei medesimi settori. **Tali valori diminuiscono però rapidamente procedendo verso l'entroterra:** già infatti a partire da circa 180 m dal ciglio nord-orientale della Darsena si riscontrano nei due scenari valori di flusso orizzontale superficiale (layer 1) paragonabili (Figura 6b).

Il flusso orizzontale aumenta gradualmente con la profondità in entrambi gli scenari ed è massimo negli strati più profondi, mantenendo valori più alti nell'assetto post-operam (Figura 9 a-c).

Sia la variazione dell'altezza della superficie piezometrica nei due scenari (attuale e di progetto) che le differenze di flusso orizzontale della falda freatica possono essere considerati come parametri indicativi dell'intensità della potenziale ingressione del "cuneo salino" verso l'entroterra.

L'analisi di tali parametri ha evidenziato, quindi, che le modifiche apportate dalle opere a progetto all'assetto delle aree adiacenti l'argine fluviale hanno un'influenza minimale sulla propagazione del cuneo salino nei settori dell'entroterra, poiché la differenza delle altezze piezometriche nei due scenari è minima, ricadendo inoltre molto vicino all'intervallo di errore strumentale delle misure piezometriche classiche, e la massima differenza tra i flussi orizzontali si registra vicino al perimetro

della Darsena a progetto. La differenza sia tra le altezze della superficie freatica sia tra i flussi orizzontali simulati si riduce inoltre gradualmente procedendo verso l'entroterra.

E' doveroso far notare come le altezze piezometriche simulate per lo stato ante-operam siano paragonabili con le altezze della superficie freatica tratte dalla bibliografia e dalle misure strumentali, seppur con qualche locale discostamento legato prevalentemente alla variazione temporanea dell'altezza del fiume Magra, molto soggetto alla variazione del regime di precipitazione del suo bacino. Nel modello è stata comunque considerata un'altezza costante delle acque del fiume Magra paragonabile con quella che si potrebbe registrare in un periodo di magra estivo e quindi con le situazioni peggiori riscontrabili per quanto riguarda la potenziale ingressione del cuneo salino nella falda.

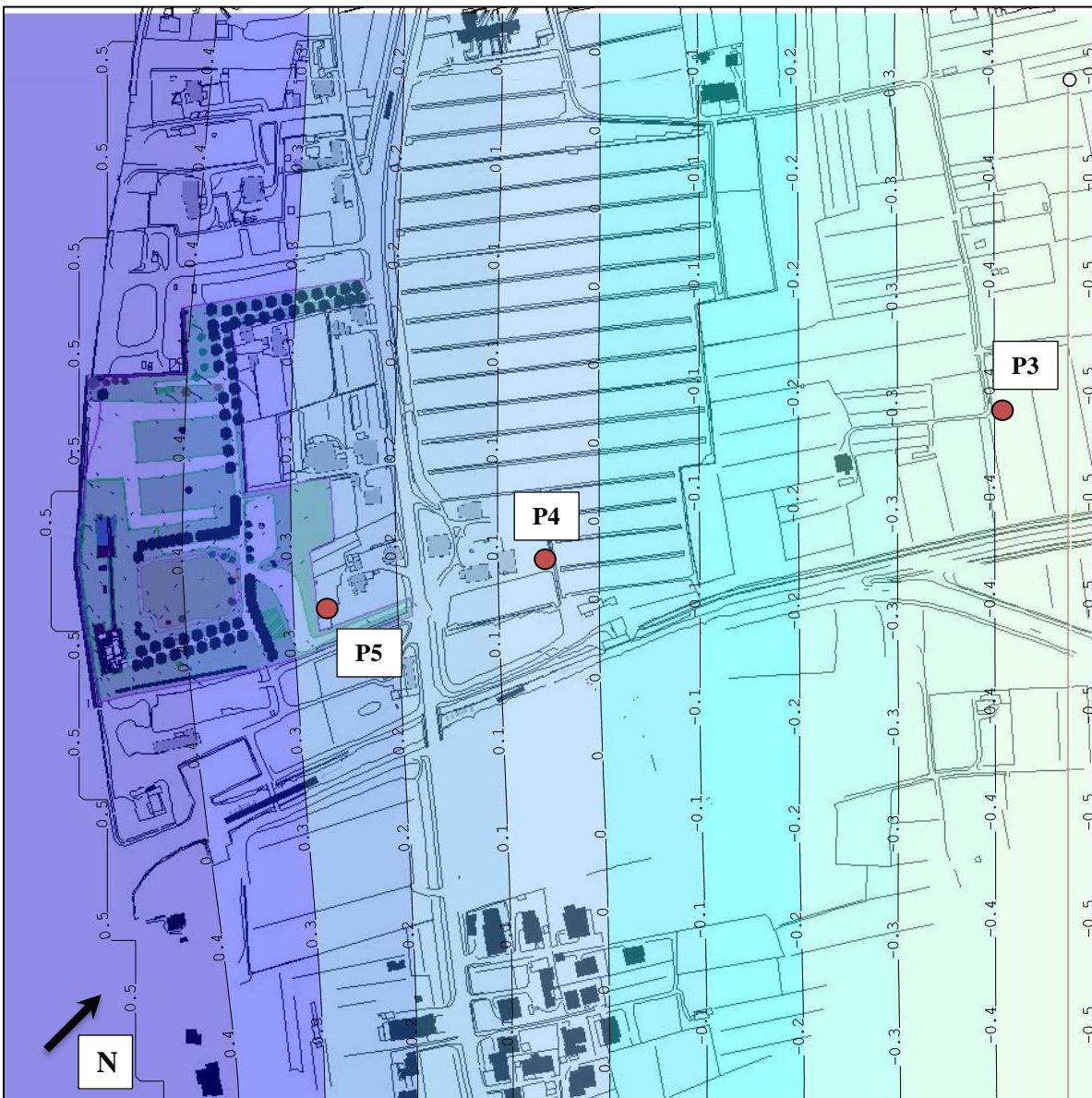


Figura 4. Altezza della superficie piezometrica simulata (m) – stato attuale (ante-operam), con indicata la localizzazione dei piezometri P3, P4 e P5.

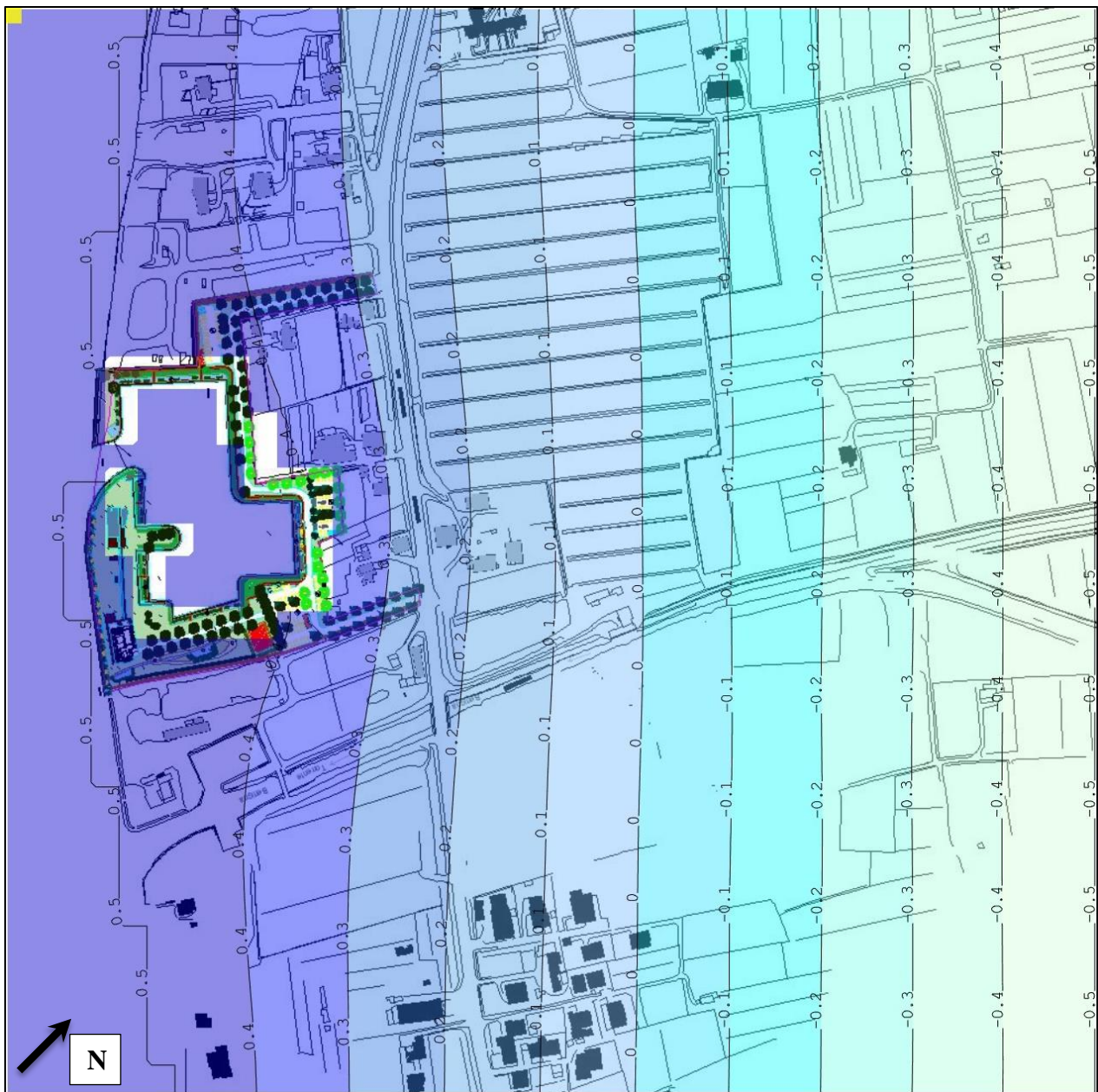


Figura 5. Altezza della superficie piezometrica simulata (m) – stato di progetto (post-operam), con presenza di scogliere e teli in HDPE a delimitare la superficie di scavo.



Figura 7. Flusso orizzontale (m³/s) nel layer 2. a) Stato attuale (ante-operam). b) stato di progetto (post-operam), con presenza di scogliere e teli in HDPE a delimitare la superficie di scavo.



Figura 8. Flusso orizzontale (m^3/s) nel layer 3. a) Stato attuale (ante-operam). b) stato di progetto (post-operam), con presenza di scogliere e teli in HDPE a delimitare la superficie di scavo.

6.3.2 Scenario post-operam con palancole vs post-operam con scogliere

Come già specificato nei paragrafi precedenti, la precedente proposta progettuale considerava la presenza di una barriera di palancole intorno alla superficie dello scavo. L'*altezza della superficie piezometrica*, considerando uno scavo con presenza di palancole, registra un innalzamento massimo, rispetto all'assetto ante-operam, di circa 5 cm: la massima differenza di quota piezometrica nei due scenari post-operam (con palancole o con scogliere), registrato nelle immediate vicinanze del perimetro della Darsena, è quindi dell'ordine dei 5 cm.

Le differenze di quota piezometrica tra scenari ante-operam e post-operam con palancole diminuiscono marcatamente procedendo verso l'entroterra, per annullarsi definitivamente a circa 500 m dal limite settentrionale della Darsena, come osservato con la presenza di una scogliera a delimitare lo scavo.

E' inoltre rilevante notare come le *differenze di altezza piezometrica tra gli scenari post-operam* (palancole vs scogliere) si riducano a 3 cm a circa 100 m dal ciglio settentrionale più a monte della Darsena.

Così come accade nello scenario con scogliere, nello scenario post-operam con palancole, i *flussi orizzontali* raggiungono i valori più alti in profondità, e nelle adiacenze del perimetro della Darsena si registrano i maggiori gradienti di flusso orizzontale. Confrontando gli scenari post-operam (palancole vs scogliere) si nota in particolare che, nel caso della presenza di palancole, e quindi a causa dell'esistenza di una barriera fisica che rallenta il flusso, esso si concentra in profondità, dove si registrano valori maggiori rispetto al caso con scogliere; diversamente, in superficie il flusso orizzontale risulta più basso rispetto a quello osservato alle medesime profondità nello scenario con scogliere (Figura 9).

In tutti gli scenari analizzati (ante- e post-operam), i flussi profondi, dopo il graduale aumento registrato rispettivamente presso il margine del fiume (ante-operam) o presso il perimetro della Darsena (post-operam), si mantengono costanti per diverse centinaia di metri nell'entroterra.

I flussi profondi, i quali possono essere considerati quelli maggiormente responsabili della potenziale intrusione del cuneo salino, hanno in entrambi gli scenari valori paragonabili (Figura 9 b-c).

In superficie, i valori di flusso orizzontale tendono a divenire paragonabili nelle due situazioni post-operam (palancole vs scogliera), a partire da circa 200 m dal limite nord-orientale della Darsena.

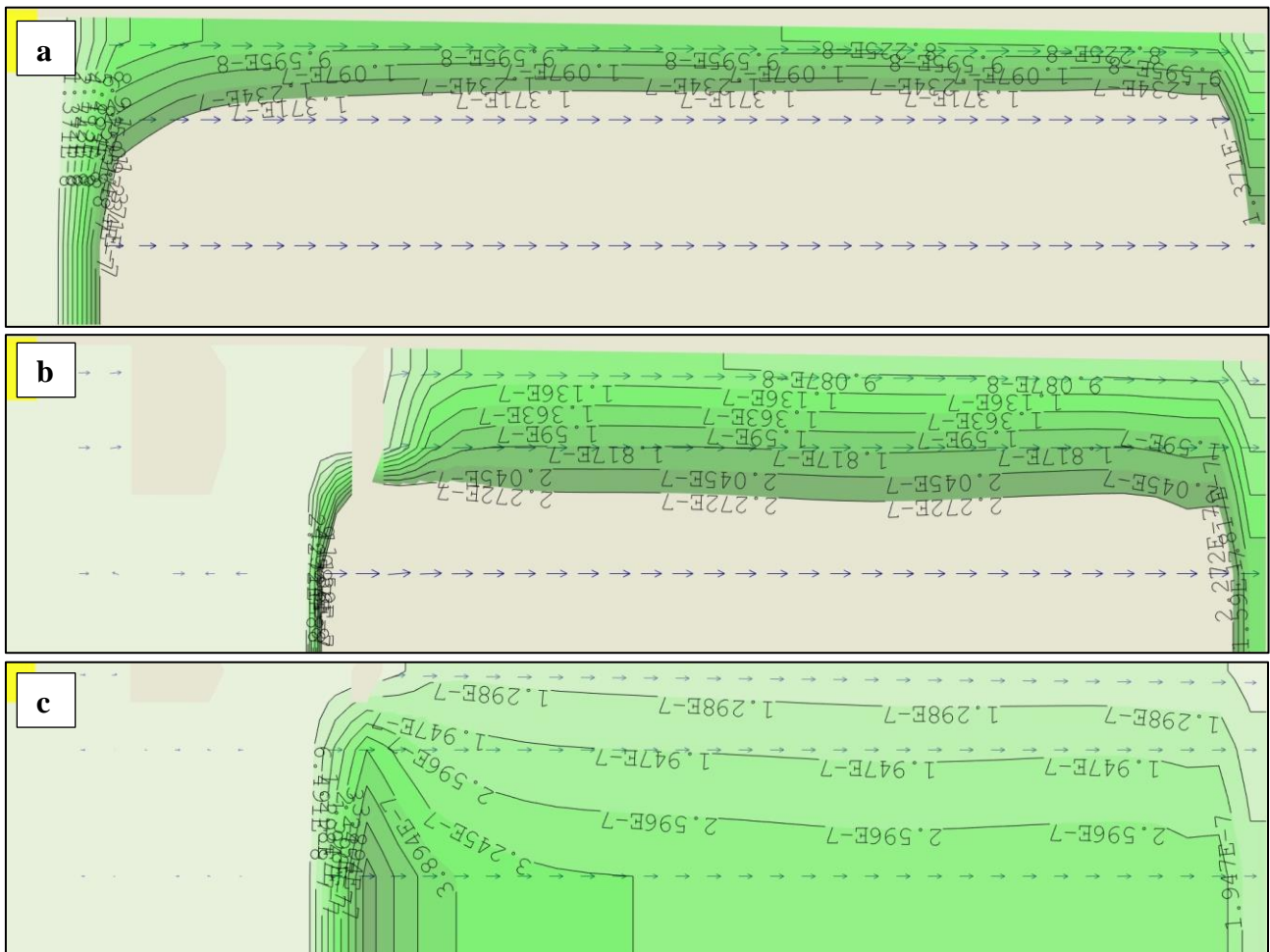


Figura 9. Flusso orizzontale (m³/s). Sezioni SW-NE dei modelli, in corrispondenza della sezione mediana della Darsena (riga 20; esagerazione verticale: 10x). Le frecce rappresentano i vettori di flusso. a) Stato ante-operam, b) stato post-operam con palancole, c) stato post-operam con scogliere e teli in HDPE.

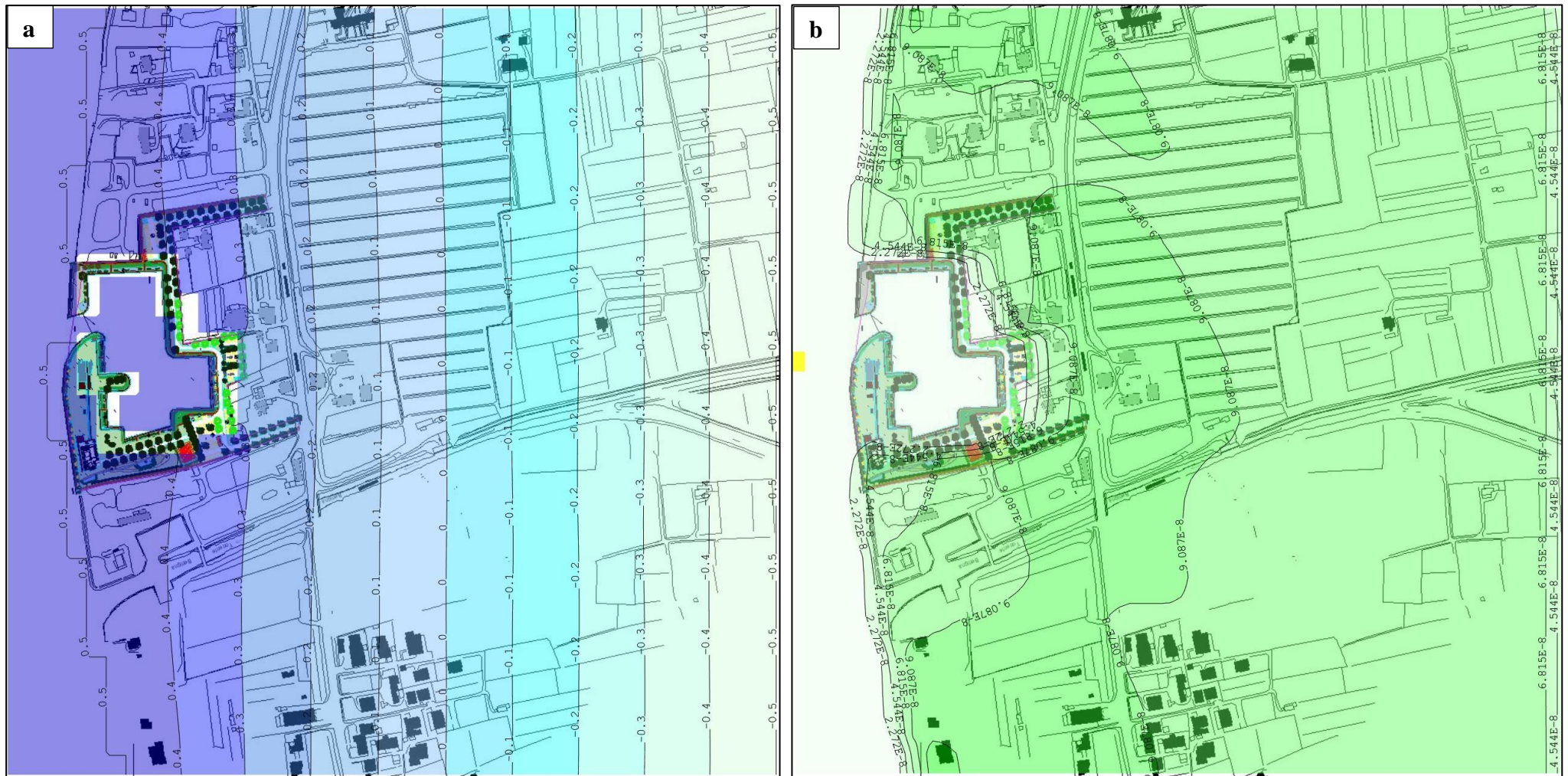


Figura 10. a) Altezza della superficie piezometrica simulata (m) – stato di progetto (post-operam), con presenza di palancole a delimitare la superficie di scavo.
 b) Flusso orizzontale (m³/s) nel layer 1. Stato di progetto (post-operam), con presenza di palancole a delimitare la superficie di scavo.



Figura 11. Flusso orizzontale (m³/s) nello stato di progetto (post-operam), con presenza di palancole a delimitare la superficie di scavo. a) Layer 2. b) Layer 3.

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'analisi della variazione delle altezze piezometriche e dei flussi orizzontali simulati negli scenari ante- e post-operam, **considerando nell'ultimo caso la presenza di scogliere e teli in HDPE a delimitare lo scavo della Darsena**, ha evidenziato, a seguito delle modifiche apportate dalle opere a progetto all'assetto delle aree adiacenti l'argine fluviale, i seguenti risultati:

- È stata accertata un'influenza minimale non significativa sulla propagazione del cuneo salino in condizioni estive nei settori dell'entroterra, poiché la differenza delle altezze piezometriche nei due scenari è minima, ricadendo inoltre molto vicino all'intervallo di errore strumentale delle misure piezometriche classiche svolte in situ; la massima differenza tra i flussi orizzontali nei due scenari si registra inoltre vicino al perimetro della Darsena.
- Sia la differenza tra le altezze della superficie freatica, sia tra i flussi orizzontali simulati nei due scenari, si riducono gradualmente procedendo verso l'entroterra.

E' stato inoltre evidenziato come i flussi profondi, i quali possono essere considerati quelli maggiormente responsabili della potenziale intrusione del cuneo salino, nello scenario post-operam con scogliere e teli in HDPE hanno valori paragonabili a quelli registrati nello scenario post-operam con palancole.

In conclusione, quindi, si conferma che:

- la realizzazione della darsena, non contigua al Fiume Magra, ma interamente circondata da terreni privati, risulta essere alimentata attraverso un canale artificiale che ha funzione di mera derivazione dell'acqua con relativa regolazione del flusso e del deflusso attraverso un sistema artificiale di ricircolo già precedentemente dettagliato nell'istanza progettuale;
- le opere a progetto non modificano sostanzialmente il regime idrogeologico del Fiume Magra;
- il modello svolto evidenzia chiaramente come, a seguito delle modifiche progettuali apportate, **non** si generino effetti negativi di salinizzazione della falda freatica o accentuazione dell'intrusione del cuneo salino, neppure durante la stagione estiva;
- l'utilizzo di una scogliera naturale, con l'aggiunta di teli in HDPE non modifica in maniera significativa l'intrusione del cuneo salino, poiché si evidenzia una oscillazione massima nei livelli piezometrici di soli 10 cm rispetto allo stato attuale, registrata in prossimità del perimetro della Darsena.

BIBLIOGRAFIA

- Carra G. - Provincia della Spezia (2011). 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, Relazione geologica e sismica.
- Frediani C. (2020). Realizzazione palancole Larssen, Fiumaretta (Comune di Ameglia), Studio geologico e sismico.
- Grassi C., Curzio P. (2018). Approfondimento sulla potenziale intrusione del cuneo salino.

ALLEGATO 1.

(Immagine e tabelle tratte da Grassi e Curzio, 2018, e riferimenti in esso contenuti)

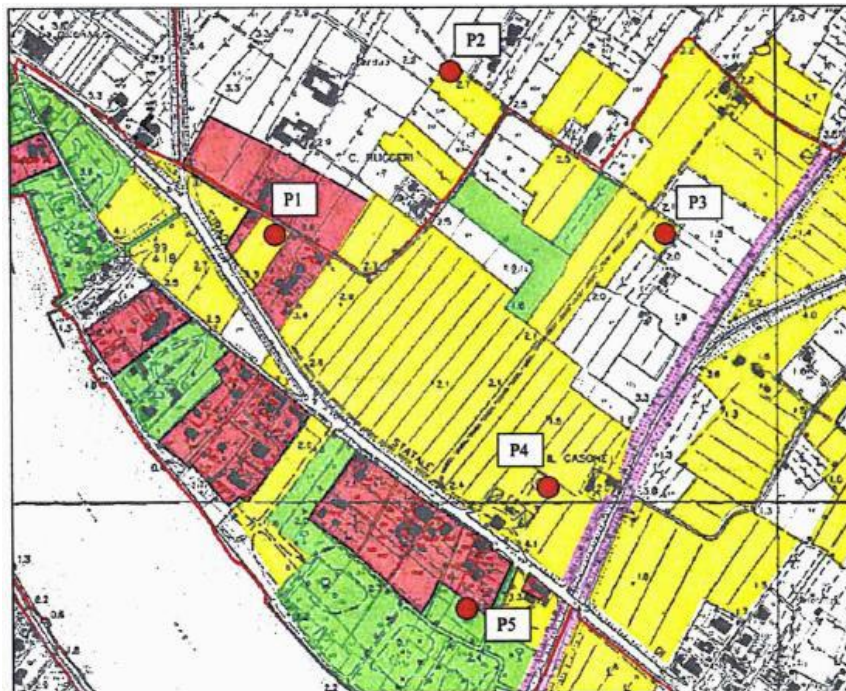



Figura 1A. Ubicazione dei sondaggi e dei relativi piezometri. Nel seguito sono riportate le descrizioni dei carotaggi presso P3, P4 e P5.

MED INGEGNERIA		Committente: MARINELLA SPA		Sondaggio P3				
		Oggetto:						
		Comune: Ameglia		UTM 34 X:				
		Ubicazione: loc. Fiumaretta		UTM 34 Y:				
		Data: 05/05/10		Profondità utile: 10,00 m				
Metodo di perforazione: carotaggio a rotazione continuo a secco				Profondità utile:				
Attrezzo di perforazione: Sonda CMV				10,00 m				
Quota inizio (m s.l.m.):		n Campione rimaneggiato per analisi chimica		prof. Falda ora:				
Profondità sondaggio (m): 10.00		l Campione indisturbato (Osterberg)						
Inclinazione (gradi): 0		t Campione da S.P.T.						
Profondità da p.c. (m)	Quote m s.l.m.	Spessore Strati (m)	Stratigrafia A.G.I. 1977	Campioni tipo	Descrizione litologica (A.G.I. 1977)	P.P. kg/cm ²	Torvane kg/cm ²	S.P.T. 15 30 45
1								
2	4.00	4.00			Limo argilloso debolmente sabbioso, colore marrone chiaro.			
3								
4								
5								
6								
7	10.00	6.00			Argilla limosa, color marrone.			
8								
9								
10								

		Committente: MARINELLA SPA		Sondaggio P4 UTM 34 X: UTM 34 Y:					
		Oggetto:							
		Comune: Ameglia							
		Ubicazione: loc. Fiumaretta							
		Data: 06/05/10							
Metodo di perforazione: carotaggio a rotazione continuo a secco					Profondità utile:				
Attrezzo di perforazione: Sonda CMV					10,00 m				
Quota inizio (m s.l.m.):		Profondità sondaggio (m): 10.00		n Campione rimaneggiato per analisi chimica					
Inclinazione (gradi): 0				l Campione indisturbato (Osterberg)					
				t Campione da S.P.T.					
Profondità da p.c. (m)	Quote m s.l.m.	Spessore Strati (m)	Stratigrafia A.G.I. 1977	Campioni tipo	Prof.	Descrizione litologica (A.G.I. 1977)	P.P. kg/cm ²	Torvane kg/cm ²	S.P.T. 15 30 45
1									
2	4.00	4.00				Sabbia fine limosa, color marrone chiaro.			
3									
4									
5									
6	8.50	4.50				Limo argilloso, colore grigio.			
7									
8									
9	10.00	1.50				Ghiaia.			
10									

MED INGENGERIA		Committente: MARINELLA SPA		Sondaggio P5					
		Oggetto:							
		Comune: Ameglia		UTM 34 X:					
		Ubicazione: loc. Fiumaretta		UTM 34 Y:					
		Data: 06/05/10							
Metodo di perforazione: carotaggio a rotazione continuo a secco				Profondità utile:					
Atrezzo di perforazione: Sonda CMV				10,00 m					
Quota inizio (m s.l.m.):		n Campione rimaneggiato per analisi chimica		prof. Falda ora:					
Profondità sondaggio (m): 10.00		l Campione indisturbato (Osterberg)							
Inclinazione (gradi): 0		t Campione da S.P.T.							
Profondità da p.c. (m)	Quote m s.l.m.	Spessore Strati (m)	Stratigrafia A.G.I. 1977	Campioni tipo	Prof.	Descrizione litologica (A.G.I. 1977)	P.P. kg/cm ²	Torvane kg/cm ²	S.P.T. 15 30 45
1		3.00				Sabbia media, color marrone chiaro.			
2									
3									
4									
5									
6		7.00							
7	10.00					Sabbia mista a ghiaia.			
8									
9									
10									

Profondità		Descrizione
da (m)	a (m)	
0,00	0,55	Ripporto 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

Figura 3A. Descrizione semplificata del carotaggio S1 (da 0 a -15 m), effettuato in prossimità del fiume, in corrispondenza all'area di scavo del progetto.

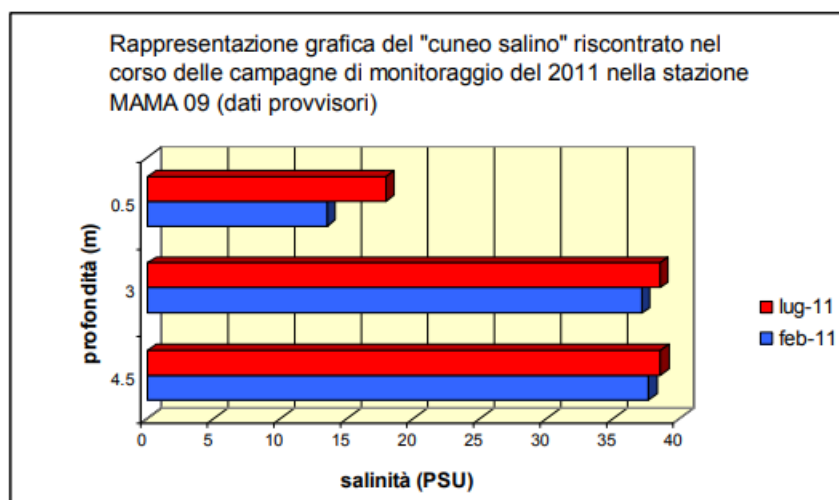


Figura 4A. Distribuzione stagionale della salinità (PSU) nella colonna d'acqua rilevata nella stazione MAMA09 nel 2011 (Monitoraggio delle acque di transizione alla foce del Fiume Magra (SP) - 2011/2013 - ARPAL)

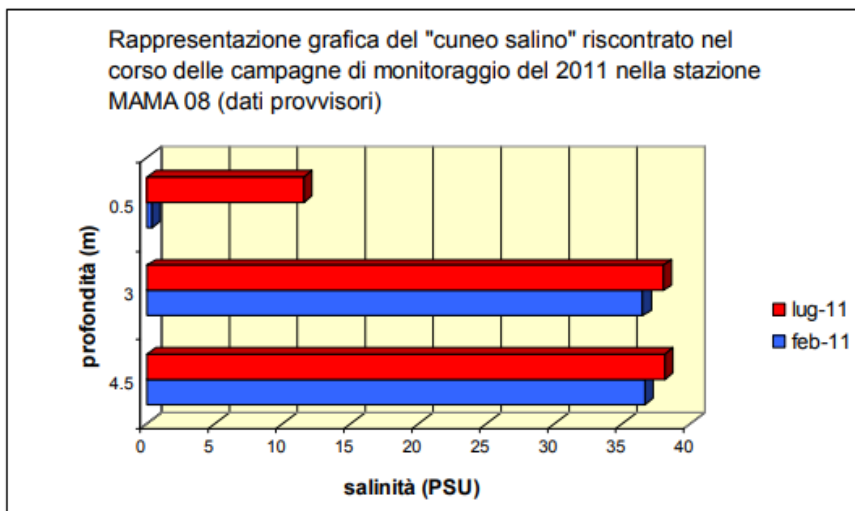


Figura 5A. Distribuzione stagionale della salinità (PSU) nella colonna d'acqua rilevata nella stazione MAMA08 nel 2011 (Monitoraggio delle acque di transizione alla foce del Fiume Magra (SP) - 2011/2013 - ARPAL)

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 6A. Parametri osservati nelle acque del Fiume Magra presso la stazione del Ponte della Colombiera nella campagna del 2013 (Monitoraggio delle acque di transizione alla foce del Fiume Magra (SP) - 2011/2013 - ARPAL)

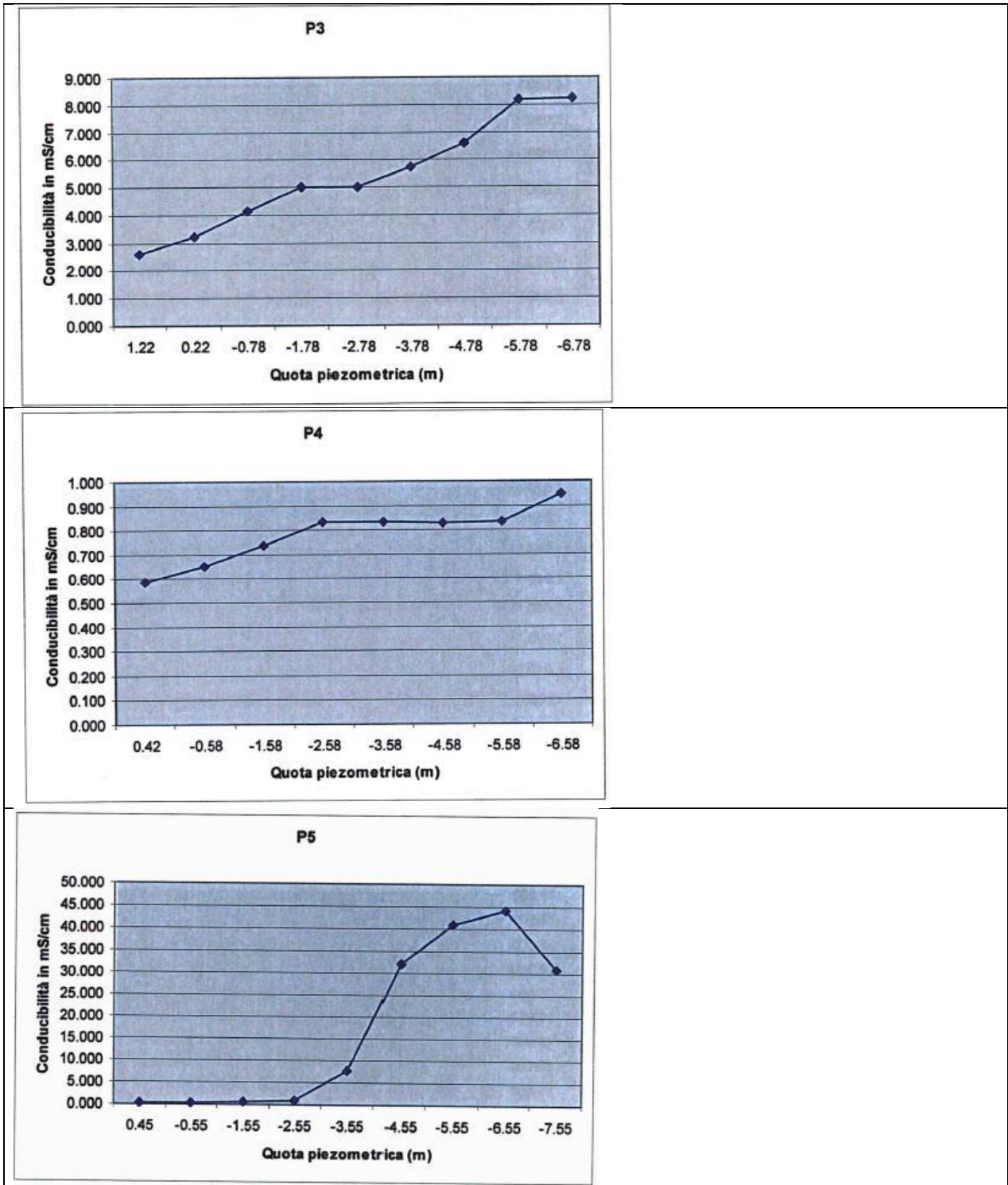


Figura 7A. Conducibilità nei piezometri P3, P4 e P5 in data 18/05/2010.

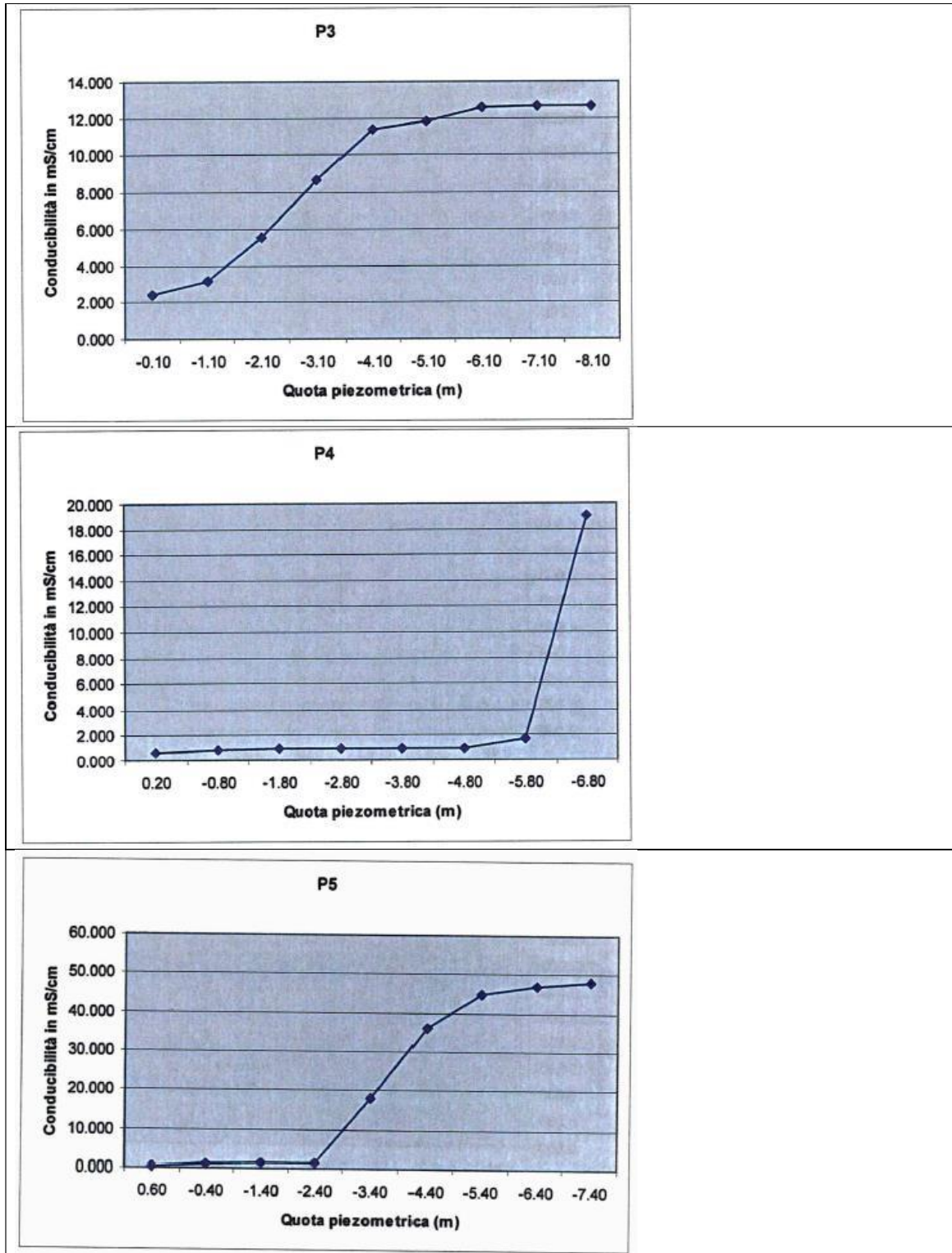


Figura 8A. Conducibilità nei piezometri P3, P4 e P5 in data 13/09/2010.

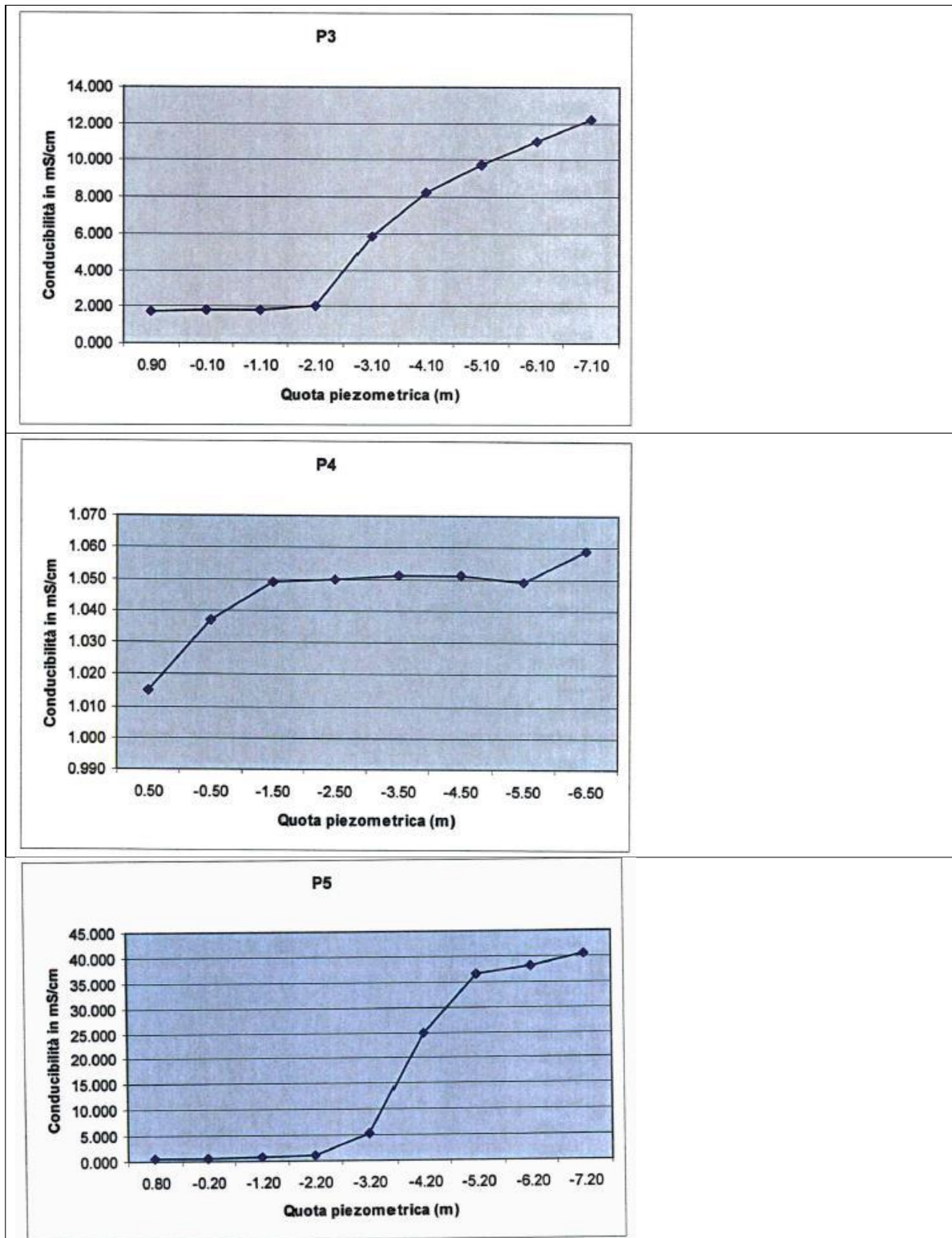


Figura 9A. Conducibilità nei piezometri P3, P4 e P5 in data 8/02/2011.

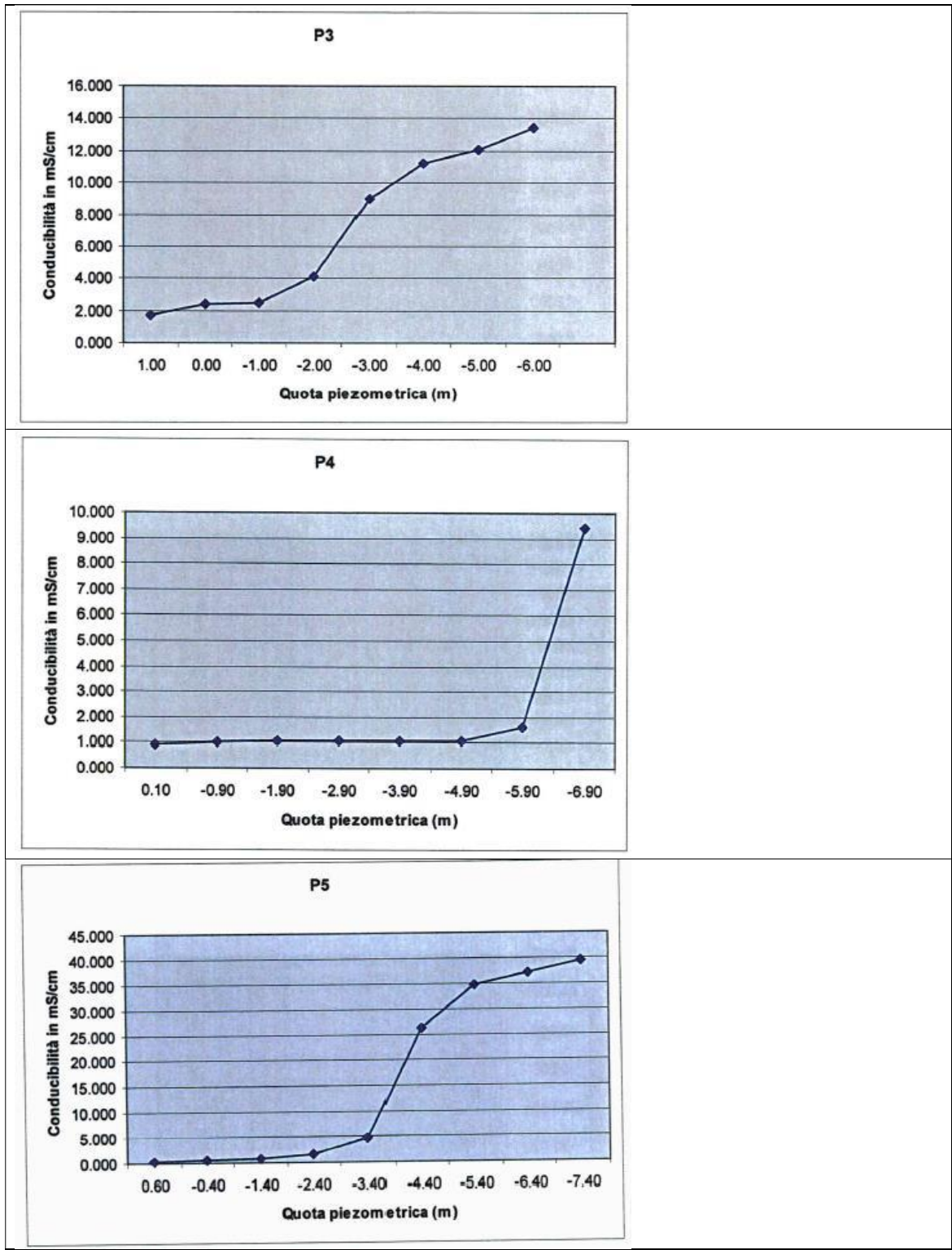


Figura 10A. Conducibilità nei piezometri P3, P4 e P5 in data 17/05/2011.

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

Figura 11A. Altezze piezometriche misurate nei piezometri P3, P4 e P5 in data 13/09/2010, quasi al termine del periodo estivo