

COMMITTENTE:



DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:



PROGETTAZIONE:



PROGETTO ESECUTIVO

LINEA BARI-LECCE - RIASSETTO NODO DI BARI

TRATTA A SUD DI BARI

VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI C.LE E BARI TORRE A MARE

VARIANTE AMBIENTALE

Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee

| | | |
|--|--|--------------|
| APPALTATORE D'Agostino Angelo Antonio Costruzioni Generali S.r.l. Ing. 01/12/2014 | PROGETTAZIONE DIRETTORE DELLA PROGETTAZIONE Ing. MARCO RASIMELLI | SCALA: -- |
|--|--|--------------|

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

IA3S 01 V ZZ RH IM0000 001 A

| Revis. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Data |
|--------|---------------------|--------------|----------|------------|----------|-------------|----------|------------------|
| A | Emissione esecutiva | F.Continisio | Mar 2021 | F. Lomurno | Mar 2021 | M.Rasimelli | Mar 2021 | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

File: IA3S01VZZRHIM0000001A

n. Elab.:

| | | | | | | |
|---|--|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|--------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 2 DI 96 |

1. PREMESSA

Nell'ambito degli interventi previsti per la bonifica e messa in sicurezza dell'area della stazione ferroviaria di FSE di Bari, il presente progetto definitivo prevede la realizzazione di un sistema di emungimento delle acque di falda, trattamento delle stesse in specifico impianto TAF e reimmissione in falda. Considerati i peculiari caratteri idrogeologici del sito oggetto di intervento, sono state eseguite valutazioni quantitative finalizzate alla stima degli impatti che il suddetto sistema potrà determinare sulla circolazione idrica sotterranea e quindi fornire elementi utili al relativo dimensionamento idraulico e alle verifiche da attuare in corso d'opera.

Sulla base delle indagini eseguite nell'ambito del Piano di Caratterizzazione ambientale del sito (Figura 1.1) viene definito un modello concettuale della circolazione idrica sotterranea e le possibili variabilità che sarà possibile incontrare in corso d'opera. A tal riguardo, attraverso approfondimenti di carattere numerico, nella presente relazione si forniscono gli elementi quantitativi atti a gestire le possibili variabilità che potranno incontrarsi durante l'esecuzione dei lavori, stante il carattere eterogeneo della formazione calcarea acquifera. Fermo restando gli obiettivi di bonifica indicati dal progetto definitivo, in relazione alle prove di portata da eseguire sui pozzi per la determinazione delle portate e ai monitoraggi previsti, potranno essere apportate variazioni al sistema di emungimento e immissione, in relazione alle locali condizioni idrogeologiche e alle condizioni di ricarica della falda nel periodo in cui saranno realizzati gli interventi, oltre che alla verifica dell'efficacia dell'intervento attraverso uno il piano di monitoraggio che, se necessario, sarà adeguato alle variazioni del sistema di emungimento.

2. RIFERIMENTI

- AGI, (1977) - Raccomandazioni per l'esecuzione delle indagini geotecniche. Associazione Geotecnica Italiana
- Badon Ghyben W. (1888) - Nota in verband met de voorgenomen put boring nabij Amsterdam. Inst. Ing. Tijdschr., (1888-1889), The Hague.
- Bear J. (1979) - Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill, New York.

| | | | | | | |
|---|--|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|--------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 3 DI 96 |

- Bradbu K.R., Muldoon M.A. & Zaporozec A. (1991) - Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks. U.S. Environmental Protection Agency, Wisconsin Geological and Natural History Survey, Madison, Environmental Protection Agency, Washington, DC. Office of GroundWater Protection;
- Celico P. (1990) - Prospezioni idrogeologiche. Liguori Ed.
- Cestari F., (2005), "Prove geotecniche in sito", Geo-Graph S.n.c.
- Cotecchia V. (1955) - Influenza dell'acqua marina sulle falde acquifere in zone costiere, con particolare riferimento alle ricerche d'acqua sotterranea in Puglia. Geotecnica n. 3.
- Cotecchia V. (1958) - Sviluppi della teoria di Ghyben ed Herzberg nello studio idrogeologico dell'alimentazione e dell'impiego delle falde acquifere, con riferimento a quella profonda delle Murge e del Salento. Geotecnica, 6.
- Cotecchia V. (1977) - Studi e ricerche sulle acque sotterranee e sull'intrusione marina in Puglia (Penisola Salentina). Quaderno n. 20 dell'Istituto di Ricerca sulle Acque del C.N.R., Roma.
- Cotecchia V. (2014) – Le acque sotterranee e l'intrusione marina in Puglia: dalla ricerca all'emergenza nella salvaguardia della risorsa. Memorie descrittive della Carta Geologica D'Italia. Volume XCII.
- Cotecchia V, Barbone G. & Scuro M (2007a) - Condizioni di impatto idrogeologico della falda acquifera sottostante alla città di Bari prodotto dalla realizzazione di un parcheggio sotterraneo in piazza Cesare Battisti - Associazione Geotecnica Italiana - Memorie in ricordo di Renato Ribacchi;
- Cotecchia V., Dileo G. A. & Scuro M (2007b) - Modellazione numerica applicata alla delimitazione delle zone di rispetto delle opere di captazione di acque sotterranee destinate al consumo umano, attigenti da acquiferi carbonatici fratturati e carsici, tipici della Regione Puglia: il caso del Distretto

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|---------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 4 DI 96 |

Estrattivo di Casamassima - Valenzano - Progetto Integrato per la salvaguardia del territorio - Segmento Progettuale A2 - Fondazione Cassa di Risparmio di Puglia - Università di Bari - Ed. Ecumenica

- Cotecchia V. & Scuro M. (2010) - Portrait of a coastal karst aquifer: the City of Bari. AQUA Mundi, Journal of water science, 1 Issue 2.
- Herzberg B. (1901) - Die wasserversorgung einiger Nordseebäder".Jour. Gasbeleuchtung and Wasserversorgung, 44, 1901, München.
- Ferrovie Sud Est s.r.l. (2013), "Indagini Preliminari Ambientali".
- Ferrovie Sud Est s.r.l. (2017), "Indagini finalizzate al campionamento in contraddittorio con Arpa Puglia per la validazione dei dati analitici inerenti al Piano di Caratterizzazione Ambientale dell'area ferroviaria della stazione di Bari Sud Est in via Oberdan-Bari"
- Kovacs A. & Sauterm (2008) - Modelling karst hydrodynamics. Frontiers of Karst Research. Karst water institute spacial publication, 13.
- Long J.C.S., Remer J.C., Wilson C.R. & Witherspoon P.A. (1982) - Porous medium equivalents for networks of discontinuous fractures. Water Resources Research, 18 (3).
- Reilly T.E. & Goodman A.S. (1987) - Analysis of saltwater upconing beneath a pumping well. Juornal of Hydrology, 89, Elsevier Science Publ. B.V., Amsterdam.
- Studio Cotecchia & Associati (2015), "Stazione Bari Sud-Est di via Oberdan – Caratterizzazione ambientale del sito – Aggiornamento al Piano delle Indagini Integrative - Relazione conclusiva sulla caratterizzazione ambientale dell'area";

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|---------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 5 DI 96 |

- Voss C.I. & Provost A.M. (2003) - SUTRA. A model for Saturated-Unsaturated, Variable-Density Ground-Water Flow with Solute or Energy Transport. U.S. Geol. Survey Water-Resources Investigation Report.
- White W.B. (2002) - Karst Hydrology: Recent developments and open question. Engineering Geology, 65.

3. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI MESSA IN SICUREZZA OPERATIVA DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Nella presente fase, in relazione alla complessità idrogeologica del sito, alla presenza di surnatante oleoso sopra falda e, in generale, al complesso quadro di inquinamento riscontrato, non è stato possibile eseguire un progetto di bonifica della falda. Risulta infatti prioritario e propedeutico procedere alla rimozione dei terreni contaminati e delle fasi libere presenti nel sottosuolo, le quali concorrono oggi fortemente al quadro di inquinamento della falda.

Nell'ambito Progetto di Bonifica e Messa in Sicurezza della Stazione FSE di Bari, sono comunque previste misure mitigative finalizzate alla Messa in Sicurezza Operativa delle acque sotterranee. In particolare è previsto un sistema mitigativo del tipo "Pump & Treat", della durata di 1 anno, dimensionato in modo da trattare un'aliquota della portata d'acqua viaggiante nell'acquifero. Il sistema proposto è così composto:

- ④ Installazione di una batteria di pozzi di emungimento lungo il perimetro di valle del sito;
- ④ Trattamento chimico-fisico in situ delle acque estratte (TAF);
- ④ Re-immissione in falda delle acque trattate conformi alle CSC attraverso una batteria di pozzi di immissione lungo il perimetro di monte del sito.

Sono stati previsti n. 15 pozzi in estrazione e n. 15 pozzi in immissione, distribuiti lungo i confini di valle e di monte del sito ad una distanza reciproca di circa 30-40 m, profondi 10 m e penetranti in falda per circa 5-6 m. In particolare il progetto già in fase definitiva ha previsto che il trattamento della falda, della durata di un anno, dovrà interessare almeno un volume di acqua sotterranea di circa 110.000 mc pari

| | | | | | | |
|---|---|-------------|---------------------|---------------------------|-----------|-------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 6 DI 96 |

a circa 2 volte il volume di acqua sotteso dall'area del sito, ipotizzando una porosità dell'acquifero carbonatico pari al 5% ed uno spessore di falda pari a circa 20 m ($55.000 \text{ mq} \times 20 \text{ m} \times 2 \times 5\% = 110.000 \text{ mc}$). Questa corrisponde ad una portata media annua per singolo pozzo pari a 0,23 l/s e ad una portata totale da trattare nell'impianto TAF pari a circa 12 mc/h. La suddetta portata potrà, pozzo per pozzo, subire modifiche in relazione alle locali condizioni idrogeologiche, tali che la portata complessiva risulti comunque rispettata. Nell'ipotesi in cui i caratteri di permeabilità locali dovessero essere tali da richiedere l'adozione di portate di emungimento modeste, tali da non consentire il trattamento di 110.000 mc di acqua in un anno, si potrà prevedere, sentiti gli Enti Competenti, che il trattamento possa proseguire oltre 1 anno, al fine di trattare un volume pari ad almeno 110.000 mc, circostanza da valutare anche in relazione alle concentrazioni dei contaminanti raggiunte ai punti di conformità.

A tal riguardo va comunque osservato che, nell'ipotesi che non vi siano ulteriori apporti di contaminanti dall'esterno del sito, il trattamento previsto potrebbe determinare la sostanziale bonifica della falda. Nel caso in cui non fossero raggiunti gli obiettivi di bonifica, in funzione dei risultati del piano di monitoraggio, dovrà essere valutata, sentiti gli Enti Competenti, l'opportunità di proseguire gli interventi previsti o eseguire interventi alternativi di bonifica.

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|---------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 7 DI 96 |

4. DEFINIZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA

Sotto il profilo idrogeologico, il sottosuolo dell'area, come diffusamente si evidenzia nella città di Bari, è caratterizzato da una ben nota circolazione idrica sotterranea, che si sviluppa nel cosiddetto acquifero profondo cretacico della Murgia, interessato dall'intrusione marina continentale (Figura 4.1). Il suddetto acquifero risulta permeabile per carsismo e per fratturazione, con significativa eterogeneità spaziale e anisotropia. La circolazione idrica sotterranea può svolgersi sia in condizioni freatiche, sia in condizioni confinate, in ragione delle locali condizioni idrogeologiche della falda.

Stante la elevata permeabilità delle rocce costituenti l'acquifero predetto, l'acqua di mare risulta, quasi ovunque, intrusa nel continente, onde costituisce il livello di base della falda di acqua dolce sovrastante. Quest'ultima galleggia, quindi, sull'acqua di intrusione marina e in dette condizioni si dirige verso la costa al recapito finale rappresentato dal mare (Figura 4.2).

In ragione dell'elevata permeabilità dell'acquifero, la cadente piezometrica risulta spesso molto bassa, e la morfologia della superficie piezometrica subisce variazioni, oltre che stagionali determinate dalle condizioni di ricarica della falda, anche di elevata frequenza, queste ultime più marcate in prossimità della costa e determinate dalla propagazione delle oscillazioni periodiche e aperiodiche del livello del mare sulla falda. In ragione delle locali condizioni idrogeologiche, possono essere inoltre osservate variazioni delle altezze piezometriche determinate dalle variazioni di pressione atmosferica.

Al fine di eseguire una corretta ed efficace modellazione matematica del moto di filtrazione nell'ambito di acquiferi complessi come nel caso in esame, risulta necessario definire un modello concettuale semplice, per cogliere gli aspetti peculiari del comportamento idraulico del corpo idrico sotterraneo galleggiante su acqua di mare ed eseguire quindi una stima degli effetti prodotti dagli interventi previsti in progetto. Inoltre, la razionale ed efficace definizione del modello concettuale è finalizzata a fornire razionali per l'impostazione del monitoraggio ambientale da eseguire durante i lavori e post-opera. Di seguito si illustrano le indagini eseguite al fine di definire il modello concettuale poi adottato nelle analisi, e le possibili variabilità che sarà possibile riscontrare in corso d'opera.

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|---------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 8 DI 96 |

4.1. Distribuzione del coefficiente di permeabilità

Per individuare il modello concettuale di acquifero razionale ed efficace, occorre innanzitutto esaminare il tipo di permeabilità che lo caratterizza.

Le formazioni acquifere sono classificabili in funzione della loro natura litologica e strutturale, e in particolare del ruolo che i vuoti svolgono nei confronti della circolazione idrica sotterranea (Cotecchia, 2014). In particolare, è possibile individuare le seguenti tipologie:

- 1) mezzo permeabile per porosità;
- 2) mezzo permeabile per fratturazione, in cui la permeabilità è legata solo al sistema delle fratture, essendo praticamente nulla quella dovuta alla porosità della matrice rocciosa, o comunque tanto inferiore da poterla trascurare nelle applicazioni pratiche;
- 3) mezzo permeabile per porosità e fratturazione, in cui la permeabilità è legata sia alle caratteristiche del sistema di fessure, sia alla porosità della matrice rocciosa; in questo caso, pur essendo la permeabilità per fratturazione di gran lunga maggiore - come nel caso precedente -, quella per porosità non è trascurabile;
- 4) mezzo permeabile per carsismo, in cui il flusso idrico ha sede fundamentalmente in cunicoli, condotti e caverne di varia geometria, determinati dal fenomeno carsico;
- 5) mezzo permeabile per carsismo e fratturazione, in cui il flusso idrico ha sede sia nei cunicoli e caverne determinati dal carsismo, sia all'interno di fratture non ancora alterate. In genere si parla anche di mezzo permeabile per fratturazione e carsismo, se quest'ultimo determina unicamente un allargamento delle fratture di origine tettonica, incrementandone così la permeabilità, senza però determinare dei veri e propri condotti carsici sotterranei.

Nel caso in esame, essendo la permeabilità per porosità praticamente trascurabile, l'acquifero dovrebbe a rigore ricadere nelle tipologie 2, 4, o 5, in ragione dell'intensità dello stato di fratturazione, della presenza di terre rosse e dello stato evolutivo del fenomeno carsico. La permeabilità della formazione mesozoiche deriva, infatti, dalla combinazione di più circostanze, anche se, in relazione al problema oggetto di studio, è sempre da valutare la possibilità di ricondurre il modello fisico reale a modelli fisico-matematici semplici, in grado di coglierne gli aspetti fondamentali, adottando le possibilità di sintesi offerte dall'idraulica sotterranea e sottoponendo di volta in volta i risultati ottenuti

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|---------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 9 DI 96 |

a verifiche sperimentali. In particolare, nel caso di acquiferi permeabili per carsismo e fratturazione, risulta spesso possibile, nell'ambito degli acquiferi mesozoici regionali, applicare l'equivalenza con il mezzo fratturato (Cotecchia et al, 2007a e 2007b, Cotecchia & Scuro, 2010; Cotecchia 2014).

Il modello di mezzo poroso equivalente (EPM), è largamente impiegato per l'esame del comportamento idraulico degli acquiferi pugliesi. Esso si basa sul concetto di volume elementare rappresentativo (REV), definito come il volume di acquifero superato il quale la densità di una specifica grandezza raggiunge un valore stabile (Bear, 1979; White, 2002; Kovacs & Sauter, 2008). Ciò significa che, assumendo volumi di acquifero progressivamente superiori al REV, il valore di detta grandezza, come ad esempio il coefficiente di permeabilità del mezzo, non cambia, a meno della presenza di eterogeneità interpretabili nell'ambito dell'idraulica dei mezzi porosi (Figura 4.3).

Il comportamento idraulico del mezzo fratturato, in particolare, si approssima a quello di un mezzo poroso, ad esempio, in caso di concorso delle seguenti condizioni (Long et alii, 1982, Cotecchia, 2014):

- la densità delle fratture è elevata;
- l'apertura delle fratture è grossomodo costante;
- l'orientamento delle fratture è ben distribuito;
- il volume testato per la determinazione del coefficiente di permeabilità ha dimensioni elevate, tali da racchiudere un campione statisticamente rappresentativo dell'ammasso roccioso.

La verifica puntuale di queste condizioni è in ogni caso alquanto soggettiva, oltre che scarsamente agevole, data la necessità di verificare la distribuzione spaziale di grandezze spesso non facilmente misurabili in situ. È possibile, tuttavia, fare riferimento ad alcuni criteri di valutazione indiretti (Bradpu et al, 1991, Cotecchia et al, 2007a e b, Cotecchia 2014) basati, tra l'altro, sull'osservazione dei risultati ottenibili da prove in situ speditive e/o di facile esecuzione. Ci si riferisce in particolare alle seguenti prospezioni idrogeologiche:

Prove di portata: l'abbassamento piezometrico misurato durante prove di pompaggio deve essere direttamente proporzionale alla portata emunta. A tale proposito si noti che perdite di carico quadratiche, misurate in corrispondenza di elevate portate di emungimento, non indicano necessariamente la inesistenza di un REV. Queste, infatti, possono attribuirsi a turbolenze nel moto,

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 10 DI 96 |

generate solo in prossimità del pozzo dalle elevate depressioni idrodinamiche applicate, fenomeno ancora interpretabile nell'ambito dell'idraulica dei mezzi porosi. Nel caso si disponga di misure di livello statico eseguite in piezometri posti nell'intorno del pozzo in emungimento, e necessario verificare che le curve depressioni/tempo, misurate per ciascun piezometro, abbiano forme simili tra loro e relazionabili con la distanza del piezometro dal pozzo, e che il cono di depressione, generato dal pompaggio, sia circolare o ellittico, in relazione alla distribuzione dei carichi piezometrici esistente prima dell'emungimento.

Determinazione della distribuzione dei carichi piezometrici: la distribuzione dei carichi piezometrici deve essere regolare, senza "gradini" o anomalie non interpretabili nell'ambito dell'idraulica dei mezzi porosi.

Valutazioni riguardanti l'effetto scala: la distanza tra le fratture entro cui si esplica la circolazione idrica sotterranea deve essere piccola in confronto al volume significativo del problema che si intende esaminare. Tale condizione implica che lo stesso acquifero, permeabile per fratturazione e carsismo, possa essere assimilato ad un mezzo poroso per la risoluzione di determinati problemi e non di altri.

Determinazione della distribuzione del coefficiente di permeabilità: nel caso in cui si disponga, nell'area di interesse, di un significativo numero di misure del coefficiente di permeabilità, eseguite con prove interpretate con i metodi dell'idraulica dei mezzi porosi, è necessario verificare che la distribuzione dei valori del coefficiente di permeabilità risultante dalle prove stesse sia ben approssimata da una curva log–normale. Nel caso in cui tale condizione non sia verificata, va comunque valutato, caso per caso, se tale circostanza è dovuta effettivamente alla non assimilabilità del mezzo fratturato ad uno poroso o a eterogeneità che possano essere interpretate nell'ambito dell'idraulica dei mezzi porosi.

Determinazione della variazione delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque di falda: i parametri chimico-fisici delle acque di falda, come temperatura, salinità e conducibilità elettrica, devono presentare valori costanti nello spazio e nel tempo, oppure presentare variazioni non attribuibili alla presenza di singolarità geostrutturali.

Individuata la possibilità di assimilare un acquifero permeabile per fratturazione e carsismo ad un mezzo continuo poroso equivalente, è necessario verificare che il moto della falda sia di tipo laminare.

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 11 DI 96 |

Solo in quest'ultima ipotesi, infatti, è possibile applicare la nota relazione di Darcy. Detta verifica può essere eseguita sulla base del numero di Reynolds R_e (Figura 4.4, Kovacs & Sauter, 2008, Ford e Williams, 2007), funzione della velocità di filtrazione ($v_f=v/n$ ove n è la porosità), della viscosità cinematica dell'acqua (ν) e delle caratteristiche geometriche della discontinuità entro cui si svolge il moto (e_h = apertura idraulica della frattura):

$$R_e = 2v_f e_h / \nu$$

Nel caso in esame, secondo quanto emerso nelle indagini idrogeologiche eseguite che saranno più avanti illustrate nel dettaglio, si può ritenere l'acquifero preliminarmente assimilabile ad un mezzo poroso equivalente, in quanto:

- le prove di permeabilità eseguite hanno mostrato un legame portata/depressione grossomodo lineare;
- la distribuzione dei carichi piezometrici e la loro variazione nel tempo risulta regolare e compatibile con una circolazione idrica sotterranea che con continuità si dirige verso la costa;
- le prove di portata eseguite hanno fornito una variabilità del coefficiente di permeabilità ben approssimabile da una curva log-normale e comunque eterogeneità spiegabili anche in ipotesi di mezzo poroso;
- i log di temperatura e conducibilità elettrica eseguiti hanno fornito una distribuzione delle caratteristiche chimico fisiche delle acque di falda con la profondità non indicanti l'esistenza di vie preferenziali di efflusso e indicanti condizioni di equilibrio tra la falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare spiegabile con l'idraulica dei mezzi porosi;

Nell'ambito dell'ipotesi di equivalenza dell'ammasso roccioso ad un mezzo poroso e di validità della legge di Darcy (quest'ultima circostanza sarà dimostrata nel paragrafo 4.2), si è proceduto a interpretare le prove di permeabilità eseguite in sito, al fine di calcolare il coefficiente di permeabilità dell'acquifero.

In particolare sono state eseguite n. 5 prove in foro di tipo Lefranc a carico costante. Le prove di permeabilità Lefranc sono state in ogni caso eseguite dopo le attività di campionamento delle acque

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 12 DI 96 |

sotterranee, al fine di non alterare le concentrazioni di inquinanti eventualmente presenti nelle acque di falda.

Le prove a carico costante sono state eseguite all'interno dei fori dei sondaggi PC6, PC9, PC10, PC11 e PC15 (Figura 1.1). In particolare, è stata misurata la portata d'acqua d'immissione necessaria a mantenere costante un determinato livello idrico nel foro. La prova è stata eseguita quindi in condizioni stazionarie. Il livello idrico imposto nel foro è stato controllato mediante un freatometro. Il valore della portata immessa, a regime idraulico costante, è stato determinato con un contaltri di sensibilità pari a 0,2 litri/min. In Figura 4.5, è riportato lo schema di prova adottato. In detta figura si indica con q (m^3/sec) la portata immessa, con Δh (m) l'incremento del carico piezometrico in condizioni stazionarie indotto dall'immissione in foro della portata q (m^3/sec), con Z (m) la lunghezza del tratto di foro assorbente, con d (m) il diametro del tratto di foro assorbente, con H (m) l'altezza del livello statico di falda indisturbato misurato rispetto al baricentro del tratto di foro assorbente.

Al fine di giungere alla determinazione della conducibilità idraulica dell'ammasso roccioso "k", sono state utilizzate due differenti relazioni in forma analitica chiusa: la prima facente riferimento al metodo di calcolo proposto da Lefranc - Mandel (Celico, 1990), una seconda definita dalle Norme AGI (1977) per Prove di immissione in fori di sondaggio. Il valore calcolato rappresenta quindi una stima orientativa del coefficiente di permeabilità. E' evidente che, nel caso di applicazione di altri metodi di calcolo diversi dalle suddette formulazioni analitiche chiuse, risulta necessario eseguire la calibrazione del modello, al fine di giungere al valore numerico di "k" da utilizzare nelle simulazioni numeriche.

L'interpretazione viene condotta assumendo (Cestari, 2005):

- dimensioni della sezione filtrante sufficientemente piccole in modo da ritenere il carico idraulico costante nei vari punti della sezione stessa;
- linee di flusso ortogonali alle pareti della sezione filtrante;
- sezione filtrante assimilata coincidente con una superficie di rivoluzione attorno all'asse del foro di sondaggio;
- applicabilità della legge di Darcy (flusso laminare).

Il metodo Lefranc-Mandel definisce il coefficiente di permeabilità k :

| | | | | | | |
|--|---|-------------|---------------------|---------------------------|-----------|--------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 13 DI 96 |

$$k = \frac{q}{C\Delta h}$$

in cui C (m) il coefficiente di forma

che tiene conto della forma della cavità di assorbimento.

Il coefficiente di forma "C" (m) può essere calcolato con la seguente relazione:

$$C = \frac{4\pi}{\left[\left(\frac{2}{Z} \right) \times \ln \left(\frac{2Z}{d} \right) - \left(\frac{1}{2H} \right) \right]}$$

Nelle Norme AGI, 1977, "k" è definito dalla seguente relazione:

$$k = \frac{q}{C_F h d}$$

ove CF (-) è un coefficiente di forma assunto pari a 2,85.

Per le cinque prove sono stati considerati come tratti assorbenti dei pozzi le parti sfinistrate desumibili dalle rispettive stratigrafie. Per le esatte caratteristiche geometriche, dati di input e risultanze di ogni prova si rimanda all'allegato 071-0002-PD-GEN-ALL-001. Il calcolo di k relativo alle prove di assorbimento è stato eseguito per i due gradini disponibili, effettuando poi la media dei due valori. In Tabella 4.1 sono riportati i risultati ottenuti.

In occasione degli spurghi dei piezometri da attuare prima dei campionamenti delle acque sotterranee, sono state eseguite ulteriori n. 23 prove di emungimento. In particolare, la prova è stata eseguita su tutti i nuovi piezometri realizzati per il Piano di Caratterizzazione (PC1÷PC16) e sui piezometri già esistenti in sito (PZ11÷PZ5, SC11÷SC4). Durante il pompaggio si è misurato il livello dell'acqua nel foro. Sono stati adottati n. 2 gradini di portata, tarati con un contenitore a volume noto. La misura del livello dell'acqua di falda "a regime" è stata effettuata con un freatimetro.

Per l'interpretazione delle prove di portata eseguite in emungimento, sono state utilizzate formula analitiche chiuse. In particolare si è fatto uso delle formule di De Glee, (1930) e Dupuit, (1863), valide per gli acquiferi confinati e freatici. A tal riguardo va osservato che la formula di Dupuit è a rigore valida per pozzi completamente penetranti nell'acquifero. Circa il significato del valore del coefficiente di permeabilità ottenuto, vale quanto detto per le prove di immissione: il valore ottenuto è da intendersi

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 14 DI 96 |

valido per l'applicazione delle formule stesse da cui derivano, o comunque al fine di ottenere una stima orientativa del coefficiente di permeabilità. Valutazioni numeriche eseguite con metodi di calcolo avanzati, richiedono la calibrazione del modello e il calcolo del valore corretto del coefficiente di permeabilità da adottare nel modello.

Entrambe le formule sono determinate nell'ipotesi di depressioni indotte dall'emungimento molto più piccole dello spessore iniziale dell'acquifero, circostanza verificata nel caso in esame.

Nel caso della formula di De Glee, che tiene conto della parziale penetrazione del pozzo nell'acquifero, si ipotizza che l'interfaccia acqua dolce-acqua di mare rappresenti per la falda un bordo impermeabile fisso e orizzontale nell'intorno del pozzo. La profondità dell'interfaccia rispetto al livello mare è stata determinata con l'applicazione della nota relazione di Ghyben–Herzberg, assumendola pari a 50 t, dove t è l'altezza piezometrica della falda rispetto al livello mare. Per la giustificazione di tale scelta si rimanda al paragrafo 4.3.

Di seguito si riportano le formule di De Glee applicate per il calcolo del coefficiente di permeabilità nel caso distinto di acquifero freatico e acquifero confinato:

- Formula di De Glee in caso di falda freatica:

$$k[m/s] = Q_w \frac{\left[\left(\frac{2}{h_s} \right) \ln \left(\frac{\pi h_s}{2r_w} \right) + \frac{0,2}{H} \right]}{4\pi(h_{2H} - h_w)}$$

valida per $\Delta = h_{2H} - h_w \ll H$, ove il significato dei simboli è indicato nella Figura 4.6.

- Formula di De Glee nel caso di acquifero confinato:

$$k[m/s] = Q_w \frac{\left[\left(\frac{2}{h_s} \right) \ln \left(\frac{\pi h_s}{2r_w} \right) + \frac{0,2}{b} \right]}{4\pi(h_{2b} - h_w)}$$

valida per $10 r_w \leq h_s \leq 0,77b$, ove il significato dei simboli è indicato nella Figura 4.6.

Nell'adottare l'approccio alla Dupuit, le linee equipotenziali sono assunte verticali e il flusso è assunto caratterizzato dalla stessa cadente piezometrica in tutti i piani orizzontali. Detta condizione si verifica,

| | | | | | | |
|--|---|-------------|---------------------|---------------------------|-----------|--------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 15 DI 96 |

teoricamente, nel caso in pozzo completamente penetrante in un acquifero confinato omogeneo e isotropo. La base dell'acquifero è quindi ipotizzata coincidente con la base del pozzo.

- Formula di Dupuit in caso di falda freatica:

$$K = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}{(H_1^2 - H_2^2)} \quad (\text{m/s})$$

ove il significato dei simboli è indicato nella Figura 4.7.

- Formula di Dupuit in caso di falda confinata:

$$K = \frac{Q}{2\pi b} \frac{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}{(H_1 - H_2)} \quad (\text{m/s})$$

ove il significato dei simboli è indicato nella Figura 4.7.

Per la stima del raggio d'influenza è stata utilizzata la relazione di Chertousov, 1962 (Bear, 1979):

$$R = 3000s_w K^{1/2}$$

dove s_w è la depressione indotta dall'emungimento.

Il calcolo di k relativo alle prove di emungimento è stato eseguito adottando la depressione e la portata di emungimento dei due gradini disponibili della prova di portata, effettuando poi la media dei due valori. I due valori sono risultati prossimi tra loro, a indicare la sostanziale linearità della curva depressione/portata. In Tabella 4.1 sono riportati i valori ottenuti dal calcolo.

I valori del coefficiente di permeabilità finali relativi ad ognuno dei pozzi, sono stati calcolati con la media di tutti i dati disponibili (Tabella 4.1), e rappresentati nel piano attraverso un'interpolazione lineare in ambiente GIS (Figura 4.8). La permeabilità è risultata mediamente compresa tra $10^{-3} \div 1$ cm/s, generalmente crescente nell'area procedendo da Sud verso Nord. I valori dei coefficienti di permeabilità riportati in Tabella 4.1 e nella Figura 4.8, sono stati quindi determinati interpretando le prove di permeabilità eseguite (in emungimento e in immissione) attraverso formule analitiche chiuse. Ove più avanti si procederà all'esecuzione di modellazioni matematiche con il metodo degli elementi

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 16 DI 96 |

finiti, si dovrà procedere alla calibrazione del modello, la quale potrà fornire valori del coefficiente di permeabilità sensibilmente differenti, anche se in genere dello stesso ordine di grandezza (Cotecchia et al, 2007b; Cotecchia, 2014).

Il risultato ottenuto ha comunque evidenziato una variabilità del coefficiente di permeabilità dovuta ad eterogeneità spaziali interpretabili con l'equivalenza del mezzo fratturato ad un mezzo poroso equivalente, non avendo invece evidenziato brusche variazioni locali imputabili a singolarità geostrutturali di entità tale da richiedere valutazioni con metodi di calcolo che tengano esplicitamente conto della presenza delle discontinuità. Inoltre, è stata osservata una distribuzione del coefficiente di permeabilità ben approssimata da una curva log-normale (Figura 4.9).

4.2. Misura della velocità di filtrazione in pozzo delle acque di falda

La velocità di filtrazione che caratterizza il moto della falda dipende, in generale, dalla cadente piezometrica, dalla persistenza, dalla geometria e dalla scabrezza delle discontinuità, dalle sporadiche presenze di ostacoli di materiali residuali lungo il percorso, dai rapporti morfologici bizzarri esistenti tra i vuoti carsici, la fratturazione tettonica e i giunti di strato, che si intersecano fra loro determinando le vie entro cui si esplica la circolazione idrica sotterranea (Cotecchia, 2014).

La velocità di filtrazione è stata misurata utilizzando la tecnica della diluizione di un tracciante artificiale in pozzo singolo (Cotecchia, 1977), per la cui dettagliata illustrazione si rimanda all'allegato 071-0002-PD-GEN-ALL-001.

Detta tecnica di misura prevede l'immissione di un tracciante lungo la colonna idrica del pozzo o lungo alcuni tratti selezionati, e la successiva misura, nello stesso pozzo, della variazione di concentrazione del tracciante nel tempo, la cui interpretazione consente di valutare l'andamento della velocità di filtrazione con la profondità. Il metodo di misura si basa sull'esistenza di una relazione tra la velocità con cui il tracciante immesso nel pozzo si diluisce e la velocità di filtrazione dell'acqua sotterranea. Inoltre, la prova può consentire di determinare l'esistenza di correnti verticali nel pozzo, le quali indicano l'esistenza di livelli idrici lungo la verticale presentanti differente altezza piezometrica e quindi andamento della pressione non idrostatico.

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 17 DI 96 |

Le prove sono state eseguite dopo le attività di campionamento finalizzate alla valutazione delle caratteristiche chimiche delle acque di falda, al fine di non alterare le concentrazioni di inquinanti eventualmente presenti nelle acque di falda.

La misura è stata effettuata nei pozzi PC5, PC11, PC13, PC14 e PC15 (Figura 1.1) con durata pari a 4 giorni circa. Successivamente all'immissione del tracciante, sono state effettuate una serie di rilievi (misura log) della concentrazione, lungo l'intera colonna idrica ad intervalli di tempo programmati in funzione della diluizione del tracciante osservata nel pozzo.

Per l'interpretazione delle velocità di filtrazione di tutti i logs effettuati su ogni pozzo, si sono considerati i tre più rappresentativi sulla base dei quali si è proceduto alla valutazione delle velocità di filtrazione attraverso le varie combinazioni degli stessi. Per i dettagli esecutivi delle prove e delle esatte concentrazioni di tracciante si rimanda allegato 071-0002-PD-GEN-ALL-001.

I risultati dei rilievi effettuati, in termini di variazione di velocità di filtrazione media, sono sintetizzati in forma grafica nelle Figure 4.10, 4.11 e 4.12, ove si rappresenta, schematicamente, la monografia dei pozzi indagati indicante il tratto superiore cementato, la parte inferiore sfinestrata, nonché il livello di falda medio misurato durante le misure.

Le velocità sono risultate comprese nell'intervallo 0,2÷10 m/gg, con i valori più alti registrati lungo il confine Est del sito in corrispondenza dei pozzi PC5 (circa 10 m/gg) e PC11 (circa 1,5 m/gg). In generale, pur considerando che i tratti indagati non corrispondono all'intero spessore dell'acquifero profondo, pare presentarsi una tendenza allo smorzamento delle velocità di filtrazione con la profondità. Ciò indica una maggiore attività dal punto di vista della circolazione idrica nei tratti acquiferi più superficiali e quindi una riduzione del coefficiente di permeabilità con la profondità, circostanza evidenziata nella città di Bari in pozzi di elevata profondità (Figura 4.13). Non si è apprezzata, invece, l'esistenza di correnti verticali, il che indica la probabile assenza di variazione dei carichi piezometrici della falda lungo le verticali indagate.

Le misure eseguite consentono di valutare se il moto possa considerarsi laminare. Al fine di determinare un valore massimo attendibile della velocità media entro le discontinuità, va osservato che la velocità di filtrazione massima misurata risulta dell'ordine di 10 m/gg, che corrisponde a $1,15 \times 10^{-4}$

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 18 DI 96 |

m/s. La velocità misurata corrisponde alla velocità di Darcy, per cui al fine di valutare la velocità media all'interno delle discontinuità, è necessario dividere il suddetto valore per la porosità del mezzo, quest'ultima assunta pari a 5%. Si ottiene quindi una velocità di filtrazione entro la discontinuità pari a $2,3 \times 10^{-3}$ m/s, che garantisce un moto laminare sino a condotti dell'ordine di 1 m di diametro (Figura 4.4). Detta circostanza assicura, evidentemente, l'applicabilità della legge di Darcy, non avendo evidenziato nei piezometri oggetto di misura, vuoti carsici delle suddette dimensioni, tranne che in un caso singolare (Piezometro Si1).

4.3. Intrusione Marina - Carotaggi multiparametrici delle acque sotterranee

Il passaggio dall'acqua dolce di falda all'acqua marina sottostante avviene tramite una zona di transizione, il cui spessore varia in ragione del carico piezometrico della falda dolce e dei caratteri idrogeologici ed idrodispersivi della roccia acquifera. Dalle circostanze predette derivano quindi qualità variabili dell'acqua dolce di falda, sia in ragione della profondità sia in ragione della distanza dalla costa e di altre condizioni idrogeologiche locali.

Una delle prime descrizioni del fenomeno dell'intrusione marina è dovuta a Badon Ghyben (1888) e a Herzberg (1901), i quali conducevano separatamente esperimenti su pozzi penetranti in acquiferi porosi di talune zone costiere dell'Olanda e dell'isola di Norderney, a nord della Germania.

Entrambi giunsero alle medesime conclusioni: osservarono, infatti, che dove la costa è formata da rocce permeabili, la falda di acqua dolce defluisce con superficie libera a quota poco superiore al livello del mare, mescolandosi in prossimità della costa all'acqua marina (Figura 4.2). L'acqua di mare si rinviene, a sua volta, entroterra, alla base della falda di acqua dolce a causa della sua maggiore densità. La profondità di rinvenimento delle acque marine intruse nel continente, misurata rispetto al livello mare, aumenta con l'aumentare della distanza dalla costa, e quindi della quota della superficie freatica della falda di acqua dolce. Ipotizzando che l'equilibrio tra i due fluidi (acqua dolce e acqua di mare) avvenga in condizioni idrostatiche e che il passaggio tra falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare avvenga in modo netto, è possibile calcolare la profondità della superficie di separazione dei due fluidi, denominata "interfaccia". Ciò è possibile imponendo l'equilibrio idrostatico tra i due fluidi lungo l'interfaccia, entrambi supposti immiscibili e di densità costante.

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 19 DI 96 |

Dette p_d e p_s , rispettivamente, la densità dell'acqua dolce di falda e dell'acqua di mare, h e t , rispettivamente, la profondità della interfaccia di separazione tra i due fluidi e l'altezza piezometrica della falda, entrambi misurati rispetto al livello mare, la condizione di equilibrio idrostatico tra i due fluidi implica che alla colonna d'acqua dolce, di peso $(h+t)p_d g$, corrisponda la colonna di acqua di mare $h p_s g$, tale che (Figura 4.14):

$$(h+t) p_d = h p_s,$$

da cui si ricava la profondità di rinvenimento h dell'interfaccia rispetto al livello del mare, pari a:

$$h = \gamma t, \text{ ove } \gamma = p_d / (p_s - p_d).$$

Per il mare Adriatico è possibile assumere in prima ipotesi una densità dell'acqua pari a $p_s = 1029,9$ g/l. Pertanto, ipotizzando un valore di densità della falda di acqua dolce $p_d = 1000$ g/l, si ricava (Cotecchia, 1955, 1977):

$$h \approx 33 t.$$

Gli studi svolti in Puglia già a partire dagli anni '50 hanno consentito, in particolare, di analizzare il rapporto esistente tra profondità dell'interfaccia e l'altezza piezometrica t , entrambe riferite al livello mare. Ipotizzando l'interfaccia coincidente con il tetto della zona di transizione, tale rapporto risulta spesso superiore a quanto ricavato teoricamente (Cotecchia 1977, 2014), seppur la legge di GybernHerzberg possa rappresentare un primo approccio semplificato al problema, da adottare comunque con cautela. Detta circostanza è imputabile alle ipotesi semplificative della suddetta legge, ossia la distribuzione idrostatica delle pressioni con la profondità e l'esistenza di una interfaccia netta. In prossimità della costa la curvatura delle linee di flusso nella zona di deflusso delle acque di falda in mare, che provoca una distorsione del reticolo di flusso (Figura 4.15). La risalita delle linee di flusso verso la zona di deflusso determina, infatti, una notevole riduzione dello spessore della falda di acqua dolce, e la componente verticale del moto di filtrazione che si determina non può essere trascurata. In dette condizioni, la distribuzione delle pressioni non è idrostatica in quanto le linee equipotenziali non risultano essere verticali. In particolare, in profondità, si osservano pressioni dell'acqua superiori a quelle valutate con la legge idrostatica, con conseguente maggior profondità della interfaccia acqua dolce-acqua di mare.

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 20 DI 96 |

Un ulteriore motivo che determina una maggior profondità della interfaccia rispetto a quella valutata con la legge di Gyben - Herzberg è l'esistenza di una zona di transizione tra la falda di acqua dolce e l'acqua di mare, nell'ambito della quale la densità dell'acqua aumenta procedendo verso il basso, a partire da valori tipici dell'acqua dolce di falda (tetto zona di transizione) sino a raggiungere i valori dell'acqua di mare (tetto dell'acqua di mare) (Figura 4.13).

In linea di massima, nelle suddette condizioni che determinano comportamenti idraulici diversi da quelli ipotizzati nella legge di Ghyben-Herzberg, quest'ultima risulta ancora applicabile per valutazioni preliminari, calibrando però opportunamente il coefficiente di proporzionalità che lega il carico piezometrico misurato alla sommità della falda con la profondità dell'interfaccia.

Al fine di analizzare i rapporti esistenti tra la falda di acqua di dolce e la sottostante acqua di mare, sono stati eseguiti nell'area in esame carotaggi multiparametrici e in particolare è stato realizzato un pozzo spia, ossia un pozzo di profondità tale da penetrare nell'acqua di mare presente alla base dell'acquifero.

L'esecuzione dei carotaggi multiparametrici lungo la colonna idrica del pozzo concorre alla caratterizzazione chimico-fisica delle acque di falda. Sono stati determinati profili verticali della conducibilità elettrica (da cui si è determinato il profilo salinometrico), della temperatura, dell'ossigeno disciolto e del potenziale di ossidoriduzione delle acque di falda. In particolare, l'andamento della stratificazione termica e salina delle acque di falda lungo la colonna idrica del "pozzo spia" realizzato nell'area, è stata utile a individuare lo spessore della lente di acqua dolce e della zona di transizione, così come la profondità del tetto delle acque marine intruse nel continente. I piezometri interessati dalle misure sono stati il PC2 (pozzo spia), il PC5 ed il PC15 (Figura 1.1). I rilievi sono stati eseguiti con i piezometri in quiete e quindi in presenza delle naturali condizioni di stratificazione salina delle acque di falda. Le misure sono state condotte lungo la colonna idrica del perforo rilevando, ad intervalli significativi, i dati relativi ai parametri suddetti. I dettagli riguardanti l'esecuzione delle indagini sono riportati in allegato 071-0002-PD-GEN-ALL-001.

I profili multiparametrici eseguiti (Figura 4.16, 4.17 e 4.18) rispecchiano in pieno i caratteri idrogeologici della falda profonda pugliese e sono concordi con i risultati delle altre indagini idrogeologiche condotte.

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 21 DI 96 |

I valori di temperatura delle acque sotterranee sono compresi nell'intervallo 16,5°-18°. Nel caso del piezometro PC2, essa risulta decrescente con la profondità, mentre ha comportamento inverso nel caso del PC15 e si mostra costante nel caso del piezometro PC5. Tali diversi comportamenti sono probabilmente legati all'eterogeneità delle caratteristiche della circolazione idrica sotterranea (permeabilità e velocità di filtrazione) che modifica i tempi di residenza dell'acqua di falda e quindi la sua temperatura. Ciò indica, inoltre, differenti modalità di circolazione idrica della falda, in accordo alle condizioni idrogeologiche rilevate dai sondaggi.

In particolare nel caso del piezometro PC2, finestrato a partire da 8 metri di profondità, assume particolare rilevanza la presenza di strati di terra rossa nell'acquifero carbonatico tra i 10 e 30 metri di profondità, che determina un incremento dei tempi di residenza delle acque e quindi della temperatura. I valori dell'ossigeno disciolto, del potenziale di ossido-riduzione e del pH indicano una maggiore attività della circolazione idrica tra 8 e 10 metri e tra 30 e 35 metri di profondità dal piano campagna. La conducibilità elettrica a 20°C, come facile attendersi, è caratterizzata da valori crescenti con la profondità, compresi nell'intervallo 0,34÷35 mS/cm. Utilizzando la conversione di Richard -Nguyen Van Cu i valori corrispondenti di concentrazione salina delle acque risultano compresi tra 0,25-30 g/l (Celico, 1990). I valori minimi si riscontrano in corrispondenza della porzione sommitale dell'acquifero, mentre i valori massimi si riscontrano approssimandosi all'acqua di mare di intrusione continentale, dopo aver superato la zona di transizione individuabile tra 25 e 30 metri di profondità dal piano campagna. In ipotesi di esistenza di un "interfaccia netta" di separazione tra la falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare, lo spessore della falda d'acqua dolce può essere calcolato considerando la suddetta interfaccia coincidente con il tetto o il letto della zona di transizione, questi ultimi disposti rispettivamente a quota -23 m IGM e -35 m IGM. Poiché il piezometro è contraddistinto da un carico piezometrico della falda profonda misurato rispetto al livello medio mare effettivo nel periodo di misura, pari a circa 0,6 m s.l.m., il coefficiente di GhybenHerzberg che ne deriva risulta pari rispettivamente a 38 e 58 rispettivamente riferiti al tetto della zona di transizione e dell'acqua di mare. Ciò giustifica il valore $\gamma = 50$ assunto nel paragrafo 4.1 per la determinazione della base dell'acquifero nel calcolo del coefficiente di permeabilità adottando formule analitiche chiuse.

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 22 DI 96 |

Va osservato che, sulla base dei principi che regolano l'equilibrio tra la falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare, qualsiasi azione che determini l'annullamento del carico piezometrico della falda lungo tutta la verticale rispetto all'effettivo del livello del mare, comporterebbe la totale salsificazione dell'acquifero. L'imposizione di barriere idrauliche (attive o passive) deve quindi essere dimensionata al fine di determinare modifiche dell'equilibrio acqua dolce-acqua di mare, accettabili.

4.4. Oscillazioni piezometriche e variazioni nel tempo della morfologia della superficie piezometrica

Le altezze piezometriche della falda possono subire variazioni sia in ragione del regime pluviometrico e quindi della ricarica della falda, sia in ragione delle variazioni di pressione atmosferica e di livello del mare. Le variazioni piezometriche indotte dalle variazioni di pressione atmosferica possono essere sia dirette, sia indirette, queste ultime dovute alle oscillazioni del livello del mare dovute alle variazioni barometriche (Cotecchia, 1977). Nel caso in esame, stante la vicinanza dalla costa, assumono particolare rilievo le variazioni dei livelli di falda dovuti alle oscillazioni del livello del mare. Come si vedrà più avanti, non è stata rilevata una significativa influenza diretta della pressione atmosferica.

Prima di procedere alla illustrazione delle indagini eseguite, si riportano alcuni richiami teorici utili alla comprensione sia della definizione del piano di indagine sia della relativa interpretazione.

In un generico punto dell'acquifero si definisce altezza piezometrica h (o carico piezometrico o quota piezometrica) rispetto ad un predefinito piano di riferimento $z = 0$:

$$h [m] = z + p/\rho g$$

dove z è l'altezza geometrica (o quota) rispetto al piano di riferimento $z = 0$, p è la pressione interstiziale dell'acqua, ρ è la densità dell'acqua e g è l'accelerazione di gravità.

La quota piezometrica è spesso calcolata assumendo $z=0$ al livello mare.

Il gradiente idraulico (o gradiente piezometrico o cadente piezometrica) lungo la linea di flusso, nell'ipotesi di moto laminare, è pari alla derivata, lungo la direzione s del flusso, del carico piezometrico:

$$i [-] = \delta h / \delta s$$

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 23 DI 96 |

Le superfici (linee in un moto piano) che uniscono i punti che presentano lo stesso valore di quota piezometrica sono definite superficie equipotenziali (o isopieziche), sempre ortogonali alle linee di flusso se si ipotizza un mezzo permeabile isotropo.

Nel caso di falde freatiche è utile definire la superficie libera quale superficie di falda (o pelo libero o water table), che è la superficie caratterizzata da pressione $p = 0$ e quindi altezza piezometrica $h = z$. In generale, la quota piezometrica è variabile con la profondità, per cui punti appartenenti a una stessa verticale possono appartenere a diverse isopieziche, come nel caso prima illustrato in Figura 4.15. Ove la suddetta variazione risulti significativa, dovrebbero rilevarsi correnti verticali nei pozzi, invece non osservate nel caso in esame, almeno sino alle massime profondità investigate (paragrafo 4.2).

Nell'interpretare i dati piezometrici raccolti nella campagna di indagine, si assume la quota del pelo libero raggiunta in un pozzo all'equilibrio, in assenza di pompaggio, pari alla quota piezometrica per tutti i punti disposti lungo la verticale nel pozzo stesso, indipendentemente dalla freaticità o meno della circolazione idrica sotterranea. In particolare, con il termine superficie piezometrica si intende la superficie che in punto ha coordinata z pari alla quota piezometrica rilevata nello stesso punto esplorato in profondità. Il valore di h sarà dato dalla quota del livello dell'acqua raggiunta nel pozzo nell'intercettare il punto profondo rilevato. Nel caso di falda freatica, interpretata secondo l'ipotesi di Dupit, la superficie piezometrica coincide con la superficie libera della falda. Nel caso di variabilità della quota piezometrica con la profondità, potranno esserci diverse superfici piezometriche per luoghi di punti di riferimento a diverse profondità. L'intersezione della superficie piezometrica con un piano verticale sarà definita linea piezometrica.

L'area in esame è caratterizzata, come visto, da una elevata permeabilità dell'acquifero carbonatico, che può raggiungere valori dell'ordine di diversi cm/s, da cui derivano ridottissime cadenti piezometriche, dell'ordine dell'1‰. In tale contesto la morfologia della superficie piezometrica risulta di difficile individuazione. La differenza di quota del livello freatico o piezometrico esistente tra piezometri tra loro vicini risulta infatti molto piccola e subisce continue variazioni in ragione delle variazioni mareografiche, che si ripercuotono sulla falda. In sostanza, le variazioni della morfologia della superficie piezometrica sono spesso dello stesso ordine di grandezza della precisione adottata

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 24 DI 96 |

nell'eseguire le misure piezometriche stesse. Inoltre, la morfologia della superficie piezometrica può modificarsi durante il corso della giornata, in ragione delle oscillazioni del livello del mare.

Lo studio della propagazione delle onde di maree sui livelli di falda consente di determinare, in linea teorica, l'oscillazione della quota piezometrica della falda che si produce in un generico punto, disposto ad una data distanza dalla costa, dovuta alle variazioni del livello mare (Cotecchia & Scuro, 2010). Per un generico punto di un acquifero omogeneo ed isotropo, distante x dalla linea di costa, è possibile calcolare le oscillazioni del livello di falda h(x,t) dovute alle oscillazioni del livello mare h(0, t), noto il parametro attenuazione A dell'acquifero. Detta h(x,t) l'oscillazione nel tempo della superficie freatica in un generico punto posto ad una distanza x dalla costa ed al tempo t, l'equazione differenziale del moto non permanente delle acque filtranti può esprimersi nella forma:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} = \frac{1}{D} \frac{\delta h}{\delta t}$$

ove D [m²/s] = KH/n, è la diffusività dell'acquifero, con K coefficiente di permeabilità, H spessore dell'acquifero e n la porosità. La diffusività dell'acquifero è legata al parametro attenuazione dalla relazione:

$$A = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{1}{D}}$$

In ogni punto dell'acquifero, l'attenuazione con cui si risentono le oscillazioni mareografiche è quindi direttamente proporzionale alla distanza dalla costa e inversamente proporzionale alla radice quadrata della diffusività.

Gli studi eseguiti in Puglia, anche attraverso la risoluzione dell'equazione differenziale del moto con il metodo delle differenze finite (Cotecchia, 1977; Cotecchia & Scuro, 2010), hanno consentito di verificare che:

- a parità di permeabilità e spessore dell'acquifero, le oscillazioni del livello di falda dovute alle variazioni del livello del mare, decrescono con l'aumentare della distanza dalla costa;

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 25 DI 96 |

- a parità di permeabilità e spessore dell'acquifero, le oscillazioni del livello di falda dovute alle variazioni del livello del mare, avvengono con un ritardo crescente con l'aumentare della distanza dalla costa;
- le oscillazioni del livello del mare di elevata frequenza non si risentono a distanze elevate dalla costa;
- le oscillazioni del mare di bassa frequenza possono ripercuotersi sui livelli di falda anche a notevole distanza dalla costa.

Quanto sopra ha indirizzato la campagna di indagine al rilievo della morfologia della superficie piezometrica in differenti momenti della giornata, oltre che all'attuazione di rilievi di tipo idrometrografico.

I rilievi piezometrici sono stati effettuati il giorno 16/04/2014 in 4 diversi momenti della giornata con il fine di ottenere 4 carte piezometriche in diverse condizioni di marea. Una ulteriore campagna piezometrica è stata condotta in occasione delle Indagini Ambientali Integrative, il giorno 1 Luglio 2015. Nello specifico, ognuna delle 4 campagne di misura effettuate il 16/04/2014, è stata effettuata nell'arco di un'ora, facendo uso di più operatori, nelle seguenti fasce orarie:

- Campagna 1: inizio ore 7.00 - fine ore 8.00;
- Campagna 2: inizio ore 9.30 - fine ore 10.30;
- Campagna 3: inizio ore 13.00 - fine ore 14.00; - Campagna 4: inizio ore 16.00 - fine ore 17.00.

Come si può osservare nella parte alta di Figura 4.19, dove sono indicati i 4 intervalli di tempo in relazione al livello idrometrico della stazione mareografica di Bari, i primi due intervalli di misura sono ricaduti in un momento grossomodo di bassa marea, mentre i successivi due si posizionano in grossomodo in condizione di alta marea. Ciò assicura che, nell'intervallo di tempo impiegato per eseguire le misure nei vari piezometri, non si sia prodotta una variazione significativa del livello del mare. Per definire la morfologia della superficie piezometrica sono stati utilizzati tutti i nuovi piezometri realizzati per la caratterizzazione ambientale dell'area (PC1÷PC16), i piezometri preesistenti in sito (PZ1÷PZ5 ed SC1÷SC4), ed ulteriori 2 piezometri (SB1-SB2) segnalati dalle FSE, oltre che un piezometro disponibile in area dal CNR di Bari, per un totale di 27 punti di misura. La parte bassa di

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 26 DI 96 |

Figura 4.19 indica, inoltre, che l'intervallo di misura della campagna del 1 Luglio 2015, è ricaduto in un momento grossomodo di alta marea. Sono stati utilizzati in questo caso tutti i nuovi piezometri realizzati per la caratterizzazione ambientale dell'area (PC1÷PC16), i piezometri preesistenti in sito (PZ1÷PZ5 ed SC1÷SC4), i 2 piezometri (Pi1-Pi2) di nuova realizzazione, per un totale di 25 punti di misura.

Vista la possibile presenza di surnatante di natura oleosa, le misure piezometriche sono state eseguite, lungo la verticale dei piezometri, tramite una sonda di interfaccia acqua - olio. Il surnatante si è presentato esclusivamente all'interno dei piezometri già esistenti in sito PZ2, PZ4 ed SC4. Per questi ultimi, in caso di impossibilità di rimozione tramite bailer, si è annotato il livello di olio e il livello dell'acqua nel foro rispetto al p.c. e successivamente è stata effettuata una correzione di quest'ultimo facendo uso della relazione di Ghyben-Herzberg, noti i pesi specifici dei surnatanti. Per i dettagli riguardanti l'attuazione delle campagne di indagine, si rimanda all'allegato 071-0002-PD-GEN-ALL001. Nelle Figure 4.20 e 4.21 sono riportate le linee piezometriche determinate a seguito delle misure eseguite.

Le altezze piezometriche misurate il 16/04/2014 si attestano da un massimo di +0,58 m IGM a Sud (PC13), ad un minimo di -0,02 m IGM a Nord (PC10). Quest'ultimo valore sembrerebbe indicare carichi piezometrici negativi della falda rispetto al mare, circostanza evidentemente non possibile in ipotesi di falda diretta verso il mare. A tal riguardo va però evidenziato che, al fine di valutare l'effettivo carico idraulico della falda rispetto al mare, è necessario fare riferimento all'effettivo del livello del mare, ossia tener conto che nel momento della misura il livello mare presentava a sua volta una differenza di quota rispetto allo zero IGM, secondo quanto riportato in Figura 4.19. Inoltre, si rileva che il livello mare ha subito, durante il periodo di misura, un sollevamento di circa 30 cm. Le oscillazioni dei livelli idrici rilevata in dette campagne piezometriche sono invece contenute nell'intervallo 1÷7 cm, in funzione dell'attenuazione nel punto considerato dell'acquifero profondo e della frequenza adottata nella misura. I livelli idrici misurati il 1/07/2015 si attestano da un massimo di +0,31 m IGM a Sud-Ovest (PZ5), ad un minimo di +0,04 m IGM procedendo verso Nord-Est (SC4) (Figura 4.21).

In linea di massima, seppur la morfologia della superficie piezometrica ha subito variazioni durante la giornata e al passaggio dall'anno 2014 al 2015, i caratteri fondamentali della circolazione idrica sotterranea sono risulta immutati. La cadente piezometrica riscontrata è mediamente dell'ordine

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 27 DI 96 |

dell'1‰, ed in generale compresa tra 0,5÷4 ‰. Dalle linee isopieziche ricavate, si desume che la direzione del deflusso idrico sotterraneo, in ipotesi di acquifero omogeneo ed isotropo, sia SO-NE, ossia in direzione del mare.

Come detto, nei vari momenti della giornata si osserva una diversa morfologia della superficie piezometrica, evidenziata dalla diversa forma assunta dalle linee piezometriche. Detta circostanza è da imputare alla diversa entità e ritardo con cui le oscillazioni del livello del mare si ripercuotono sulla falda.

L'esistenza e entità delle oscillazioni del livello di falda imputabili alle oscillazioni del livello del mare sono desumibili dalle indagini idrometrografiche eseguite. Nelle Figure 4.22, 4.23 e 4.24 è riportato l'andamento del livello di falda misurato in n. 3 idrometrografi installati nei piezometri PC4, PC8, e PC12, nel periodo compreso tra il 18/04/2014 e il 15/05/2014, confrontati con le variazioni mareografiche e barometriche misurate al Mareografo di Bari (<http://www.mareografico.it/>) nel medesimo periodo. Il livello di falda ed il livello mare sono entrambi riferiti allo zero IGM, anche se quest'ultimo non equivale specificamente al livello medio marino della città di Bari (Cotecchia & Scuro, 2010).

Le letture idrometrografiche eseguite mostrano i legami esistenti tra le oscillazioni mareografiche e quelle piezometriche. Data la vicinanza della costa all'area di riferimento e la notevole permeabilità dell'acquifero, l'attenuazione risulta bassa per cui il ritardo con cui gli effetti delle maree si risentono sui livelli di falda e lo smorzamento risultano modesti, contenuti entro alcune ore. In particolare, nel caso dei pozzi PC4 e PC8 il ritardo è dell'ordine delle 3-4 ore. Nel caso del pozzo PC12 il ritardo giunge anche a 5-6 ore. L'aumento del ritardo nel PC12 è probabilmente dovuto alla riduzione, in corrispondenza del pozzo, della permeabilità dell'acquifero carbonatico (cfr. Figura 4.8). L'oscillazione massima si è riscontrata nel pozzo PC4 ed è pari a 27 cm (ove l'attenuazione è minima), mentre la minima si registra nel PC12 ed è pari a 8 cm (ove l'attenuazione è risultata massima).

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 28 DI 96 |

5. VERIFICA DEL SISTEMA DI POZZI IN RELAZIONE ALLE PROBLEMATICHE RIGUARDANTI LA FORMAZIONE DEL CONO DI INTRUSIONE MARINA

Il progetto di bonifica e messa in sicurezza operativa prevede l'adozione di un sistema di pozzi in emungimento, con conseguente reimmissione delle acque trattate in falda.

L'estrazione di acqua dolce da una falda avente alla base acqua di mare di intrusione continentale, come nel caso in esame, è un'operazione che richiede specifici criteri di progettazione e gestione. Il pompaggio di acqua dolce attuato mediante pozzi comporta il sollevamento delle acque marine a causa delle depressioni idrodinamiche generate dal pompaggio stesso, con la formazione di un cono di intrusione di acqua di mare nella falda di acqua dolce, fenomeno in genere denominato brevemente "saltwater upconing". Il fenomeno può essere illustrato in modo semplificato ma efficace in ipotesi di esistenza di una interfaccia netta di separazione tra falda di acqua dolce e sottostante acqua di mare. In un acquifero omogeneo ed isotropo, disposto ad una distanza dalla costa tale da poter assimilare, in assenza di emungimento, sia la superficie della falda sia l'interfaccia orizzontali nell'intorno di una generica opera di captazione in esso parzialmente penetrante (Figura 5.1), l'emungimento attuato da un pozzo di una portata di Q_2 da ritenersi modesta, determina una depressione Δ_2 della superficie libera falda, e il sollevamento dell'interfaccia di una quantità ζ_2 , che in definitiva determina l'intrusione nella falda di acqua dolce di un cono di acqua marina, con vertice disposto lungo l'asse del pozzo. Incrementando la portata di emungimento al valore $Q_3 > Q_2$, si ottiene una depressione $\Delta_3 > \Delta_2$, cui corrisponde un cono di intrusione marina caratterizzato da un sollevamento dell'interfaccia $\zeta_3 > \zeta_2$. L'aumento della portata di pompaggio determina, quindi, il progressivo sollevamento del cono di intrusione marina, in quanto, all'aumentare dell'emungimento, diminuisce la pressione idrica nella falda di acqua dolce in prossimità dell'interfaccia, cui deve necessariamente corrispondere un sollevamento dell'acqua di mare per poter garantire l'equilibrio delle pressioni tra i due fluidi in corrispondenza dell'interfaccia. Il sollevamento aumenta sino a quando non è più possibile conseguire condizioni di equilibrio tra l'acqua dolce e l'acqua di mare in corrispondenza dell'interfaccia. Il valore teorico di portata limite, in corrispondenza del quale è ancora possibile conseguire l'equilibrio tra la falda e l'acqua di mare, è definito portata critica ($Q_{critico}$), cui corrisponde una depressione critica $\Delta_{critico}$ ed un

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 29 DI 96 |

sollevamento dell'interfaccia $\zeta_{critico}$. Un'ulteriore incremento della portata determina l'irruzione dell'acqua di mare nel pozzo. Sulla base dell'osservazione del comportamento idraulico di un elevato numero di pozzi, già dagli inizi degli anni '50 del secolo scorso, si raccomandava l'adozione di portate di emungimento contenute, tali da non produrre un'alterazione significativa dell'equilibrio acqua dolce di falda - acqua di mare. Un metodo per determinare condizioni di esercizio ragionevoli per le opere di captazione è quello di limitare le depressioni Δt in funzione della penetrazione del pozzo in falda e del carico piezometrico, con relazioni del tipo (Cotecchia, 1958):

$$\Delta t [m] < \frac{t}{2} - 0,01562L'$$

dove:

t [m] = altezza piezometrica della falda indisturbata;

L' [m] = penetrazione del pozzo misurata a partire dal livello mare.

Per il caso in esame la depressione critica valutato con tale metodo è pari circa a 7 cm. Adottando una permeabilità media dell'acquifero pari a 10^{-3} m/s, in ipotesi di falda freatica, applicando la formula di De Glee (1930) come illustrato nel paragrafo 4.1, si ottiene un valore di portata critica pari a 0,5 l/s, che risulta maggiore al valore medio di progetto, pari a 0,23 l/s (paragrafo 3). Ciò assicura, in via preliminare, la fattibilità di quanto previsto in progetto, fermo restando la necessità di eseguire prove di portata e monitoraggio in corso d'opera, al fine di confermare le ipotesi di progetto e comunque pervenire, ove necessario, a una distribuzione delle portate di emungimento tra i pozzi in relazione alle locali condizioni di permeabilità del mezzo.

La presenza di una zona di transizione, specie nei casi ove questa assuma spessore rilevante in relazione allo spessore della falda, può condizionare notevolmente l'esercizio dei pozzi, in quanto già per portate molto inferiori a quella critica prima definita, risulta possibile emungere acqua con contenuti salini rilevanti a causa delle variazioni di forma e posizione della zona di transizione.

La descrizione fisico-matematica del saltwater upconing, secondo i più moderni approcci numerici, deriva dall'accoppiamento di un problema di filtrazione di fluidi a densità variabile ad un problema di

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 30 DI 96 |

trasporto della massa di sale, quest'ultimo analizzabile nell'ambito della teoria della dispersione idrodinamica (Bear, 1979; Cotecchia, 2014). Nel caso in esame il calcolo è stato eseguito l'ausilio del codice di calcolo agli elementi finiti SUTRA (Voss e Provost, 2003). Si tratta di un codice di calcolo di pubblico dominio, largamente utilizzato nel mondo per la soluzione di problemi generali di idrogeologia, data la sua estrema flessibilità. SUTRA (Saturated-Unsaturated-TRANsport) è un codice di calcolo che consente, attraverso l'applicazione del metodo degli Elementi Finiti e delle Differenze Finite, di simulare numericamente i moti di filtrazione ed il trasporto di sostanze disciolte o di energia termica. Esso implementa elementi finiti sia bidimensionali sia tridimensionali. Per risolvere le equazioni differenziali che reggono il problema della filtrazione (equazione di continuità nell'ipotesi di validità della legge di Darcy) e della dispersione idrodinamica (equazione di conservazione della massa di soluto o di conservazione dell'energia termica) esso adotta sia il metodo degli elementi finiti, per le variabili spaziali, sia il metodo delle differenze finite, per le variabili temporali. In particolare è possibile risolvere problemi di filtrazione in condizioni sature o non sature in cui il fluido presenta variabilità nella densità causata dalla variazione nello spazio e nel tempo della concentrazione di soluto oppure della temperatura; è possibile inoltre risolvere problemi di trasporto del soluto nella massa liquida sia per diffusione molecolare sia per dispersione idrodinamica, nonché problemi di trasporto di energia termica. Tutte le analisi sono poi risolvibili con condizioni al contorno variabili nel tempo. Come variabili risultanti dal calcolo SUTRA fornisce la pressione del fluido (o l'altezza piezometrica se la densità è costante), i vettori velocità di filtrazione, la concentrazione di soluto e la temperatura (in caso di analisi termiche) in tutti i nodi di calcolo e in tutti gli istanti di tempo, se il moto non è stazionario. La possibilità di eseguire calcolazioni in presenza di fluidi a densità variabile nell'ambito della teoria della dispersione idrodinamica consente quindi di valutare la variazione di forma della zona di transizione tra la falda di acqua dolce e quella di acqua di mare di invasione continentale, presente alla base dell'acquifero in esame, conseguenti alla realizzazione dei previsti pozzi di emungimento.

Nell'ipotesi di considerare il mezzo permeabile come poroso equivalente, omogeneo ed isotropo, la distribuzione della concentrazione salina nella falda nell'intorno di un pozzo in regime di emungimento, presenta una simmetria radiale, per cui è sufficiente svolgere l'analisi in un piano diametrale del cilindro di asse coincidente con l'asse del pozzo (Figura 5.2). Il problema piano equivalente a quello

| | | | | | | |
|--|---|-------------|---------------------|---------------------------|-----------|--------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 31 DI 96 |

assialsimmetrico, vede lo spessore del modello assumere valore $2\pi r$, dove r è la distanza dall'asse del pozzo (Reilly & Goodman, 1987; Voss & Provost, 2003).

Al fine di analizzare la filtrazione a densità variabile con il metodo degli elementi finiti, il piano diametrale considerato nelle analisi viene quindi discretizzato, adottando un livello di infittimento della mesh tale da rappresentare adeguatamente la variabilità della concentrazione salina e garantire la stabilità del metodo numerico; esso è stato determinato per successivi tentativi, eseguendo verifiche sui risultati e sul numero di Peclet della mesh (VOSS & PROVOST, 2003).

Nella definizione della distribuzione di pressione iniziale è stata adottata l'ipotesi idrostatica, dunque di altezza piezometrica costante. È stato inoltre assunto, per semplicità, acqua dolce e acqua di mare di densità costante e zona di transizione con densità variabile, caratterizzata da un incremento lineare con la profondità della concentrazione salina. Detta ipotesi comporta un andamento iniziale crescente lineare della pressione nella falda di acqua dolce e nell'acqua di mare, ed un andamento crescente parabolico nella zona di transizione. Infine si è assunta l'ipotesi di falda confinata, con pressione interstiziale nulla al tetto dell'acquifero nelle condizioni iniziali.

Dette z_0 e z_1 , rispettivamente le quote del letto e del tetto della zona di transizione, e z_2 la quota del tetto dell'acquifero (Figura 5.3), si ha quindi: - per $z \geq z_1$,

$$p(z) = (z_2 - z)\rho_d g,$$

dove ρ_d è la densità della falda di acqua dolce e g è l'accelerazione di gravità; -

per $z_0 \leq z < z_1$,

$$p(z) = p(z_1) + g \int_z^{z_1} \rho(z) dz$$

dove $\rho(z)$ è il valore della densità alla generica quota z della zona di transizione, funzione della stratificazione salina presente; - per $z < z_0$, $p(z) = p(z_0) + \rho_s g(z_0 - z)$ dove ρ_s è la densità dell'acqua di mare.

Va osservato che la densità dell'acqua nell'ambito della zona di transizione può essere determinata, con buona approssimazione, secondo la relazione (VOSS & PROVOST, 2003):

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 32 DI 96 |

$$\rho(c) = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial c} (c - c_0)$$

dove:

c_0 [kg/kg] = concentrazione salina iniziale della falda, qui assunta pari a zero;

ρ_0 [kg/m³] = valore iniziale della densità della falda corrispondente al valore c_0 della concentrazione salina, in questo caso pari a 1.000 g/l;

c [kg/kg] = concentrazione salina in corrispondenza della quale si vuole determinare il valore della densità.

$\delta\rho/\delta c$ = [kg/m³] = variazione della densità della fase liquida corrispondente ad una variazione unitaria di concentrazione di sale, che, nel caso di miscelamento tra acqua dolce di falda ed acqua di mare e in assenza di specifiche determinazioni, si può assumere pari a 700 kg/m³.

Nell'ambito delle condizioni iniziali e al contorno, è inoltre necessario predisporre la posizione della zona di transizione. In particolare si è fatto riferimento a quanto determinato per il pozzo spia PC2, ossia:

- spessore della falda di acqua dolce pari a 28 m;
- spessore della zona di transizione pari a 12 m, con andamento lineare della concentrazione;
- acqua di mare a partire da una profondità dal tetto dell'acquifero pari a 40 m, con concentrazione salina pari a 30 g/l.

Dopo aver stabilito posizione e forma della zona di transizione, è stato necessario fissare le condizioni al contorno ai bordi del modello. Con riferimento alla Figura 5.3, gli unici bordi sui quali è possibile assegnare delle condizioni al contorno fisicamente esistenti nella realtà, sono AB, nella porzione ove è ubicato il pozzo, e AC che rappresenta il tetto dell'acquifero in quanto supposto confinato. Sui bordi CD e BD non è invece possibile definire delle condizioni al contorno desumibili dall'assetto geometrico e fisico reale, per cui tali bordi sono stati disposti ad una distanza che possa corrispondere al bordo della zona di influenza, ossia in un'area ove ormai gli effetti prodotti dall'emungimento del pozzo sono trascurabili.

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 33 DI 96 |

Le condizioni al contorno assunte sono dunque le seguenti:

- bordo CD: è assunta una distribuzione della pressione idrica con la profondità pari a quella iniziale idrostatica, secondo le equazioni prima descritte con riferimento alle condizioni iniziali;
- bordo AB: è assunto quale bordo impermeabile per la porzione non interessata dal pozzo, stante l'assunta simmetria radiale. Il pozzo è stato invece simulato attraverso l'imposizione della portata di emungimento.
- bordo BD: è assunta una pressione idrica costante pari a quella ivi calcolata nelle condizioni iniziali;
- bordo AC: è assunto quale bordo impermeabile.

Sui bordi BD e CD, ossia ove si è impostata la pressione idrica, è necessario imporre anche il valore di salinità dell'acqua che entrerà nel modello. In particolare si è assunta, in ogni punto, una salinità pari a quella imposta per le condizioni iniziali.

Infine, nelle analisi eseguite, stante la mancanza di dati, la dispersione longitudinale α_L e quella trasversale α_T sono state assunte pari rispettivamente ad 1 m e 0,5 m. La porosità dell'acquifero è stata assunta pari a $n = 5\%$.

Al fine di risolvere il sistema di equazioni differenziali accoppiate costituito dalle due equazioni, una della filtrazione e una della dispersione idrodinamica, SUTRA esegue iterazioni, per ogni intervallo di tempo stabilito, la cui ampiezza è in genere determinata dalla necessità di ottenere la rapida convergenza del calcolo. La soluzione in condizioni stazionarie è quindi determinata attraverso un calcolo transitorio, sino a osservare la stabilizzazione della distribuzione della concentrazione salina. La prima valutazione quantitativa è stata eseguita in ipotesi di esistenza del mezzo poroso equivalente alla scala del sito, con coefficiente di permeabilità pari a quello medio ottenuto dalle prove di portata interpretate con la formula di De Glee (paragrafo 4.1, Figura 4.9) e portata pari a quella media dell'impianto previsto in progetto, ossia:

$$k = 3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$q = 0,23 \text{ l/s}$$

Il modello geometrico ha altezza complessiva pari a 60 m ed un raggio pari a 250 m, discretizzato in elementi finiti rettangolari di lunghezza, in direzione radiale, mediamente pari a circa 2,5 m, con elementi più fitti ai bordi del modello fino ad un minimo di 0,60 m, mentre l'altezza di detti elementi è

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 34 DI 96 |

stata imposta pari a circa 0,50 m nella porzione di acquifero interessata dal pozzo, e 1 m in quella sottostante (Figura 5.4).

Il calcolo è stato eseguito per una durata pari a 1 anno, ossia la durata del periodo previsto per la MISO. A tal riguardo è comunque da evidenziare che il fenomeno transitorio in sito può subire significative modifiche rispetto a quanto determinabile in via analitica, in ragione delle locali condizioni geotecniche e idrogeologiche (porosità, compressibilità, etc.,)

Il calcolo evidenzia, dopo 1 anno di emungimento, una modifica di forma della zona di transizione (Figura 5.5), con sollevamento della isoalina relativa a 1 g/l, che raggiunge la base del pozzo, e sostanziale immobilità delle isoaline caratterizzate da valori superiori a 5 g/l. Si evidenzia la sostanziale sostenibilità dell'emungimento in dette condizioni. La condizione ottenuta dopo un anno di emungimento è sostanzialmente stazionaria, per cui l'esercizio del pozzo può proseguire in sicurezza, con le stesse caratteristiche, anche dopo un anno di emungimento.

Al fine di tener conto di possibili variazioni locali del coefficiente di permeabilità sono state eseguite ulteriori simulazioni numeriche. In particolare si è proceduto a calibrare il modello numerico al fine di determinare i valori minimi e massimi del coefficiente di permeabilità, sulla base delle prove di emungimento eseguite. La calibrazione è stata eseguita in assenza del trasporto, ossia eseguendo simulazioni a densità costante pari a quella dell'acqua di mare, essendo il valore della depressione poco sensibile alla distribuzione della concentrazione salina in ipotesi di modesto sollevamento dell'acqua di mare (Cotecchia, 2014).

Le prove prese in considerazione sono quelle eseguite nei piezometri PC9 e PC13 (Figura 1.1), ritenuti casi limite dal punto di vista della distribuzione delle permeabilità in sito (Figura 4.8). Le caratteristiche di detti piezometri, ed i risultati delle prove di emungimento, possono essere così sintetizzati:

Piezometro PC9:

- Altezza piezometrica falda $t = 0,26$ m s.l.m.;
- Spessore della falda assunto $H = 28$ m (cfr. paragrafo 4.3);
- Penetrazione del pozzo in falda $L = 7,85$ m;

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 35 DI 96 |

- Percentuale di penetrazione $P = L/H = 28 \%$;

I gradino prova di portata: $q = 0,03 \text{ l/s}$; depressione $sw = 0,005 \text{ m}$

Il gradino prova di portata: $q = 0,1 \text{ l/s}$; depressione $sw = 0,015 \text{ m}$

Piezometro PC13:

Altezza piezometrica falda = $0,77 \text{ m s.l.m.}$;

- Spessore della falda assunto $H = 28 \text{ m}$ (cfr. paragrafo 4.3);

Penetrazione del pozzo in falda $L = 6,25 \text{ m}$;

Percentuale di penetrazione $P = L/H = 22 \%$;

I gradino prova di portata: $q = 0,02 \text{ l/s}$; depressione: $sw = 0,115 \text{ m}$

Il gradino prova di portata: $q = 0,12 \text{ l/s}$; depressione: $sw = 0,54 \text{ m}$

La calibrazione è consistita nel variare il coefficiente di permeabilità dell'acquifero sino a ottenere, con il valore di portata assegnato durante la prova, il relativo valore di depressione idrodinamica della falda.

I valori di coefficiente di permeabilità che meglio hanno simulato le prove di emungimento eseguite nei due piezometri (Figura 5.6), sono risultati essere:

$$k_{pc9} = 8 \times 10^{-4} \text{ m/s};$$

$$k_{pc13} = 7 \times 10^{-6} \text{ m/s}.$$

I due piezometri presentano permeabilità significativamente differenti, cui corrisponde anche un differente comportamento nei confronti del salt-water upconing, di cui è necessario tener conto in fase di progettazione ed esercizio dei pozzi, al fine di scongiurare la salinizzazione delle acque emunte e comunque un significativo impatto sulle condizioni di equilibrio idrogeologico. Il piezometro PC13 presenta, infatti, un valore di permeabilità significativamente inferiore a quello del piezometro PC9, cui corrisponde, a parità di portata emunta, una maggiore predisposizione dell'acquifero al fenomeno dell'upconing.

Per tale motivo le analisi numeriche sono state finalizzate a valutare la massima portata emungibile in condizioni stazionarie per ciascun piezometro, tale ossia da non provocare, in un arco di tempo paragonabile alla durata di operatività dei pozzi (1 anno), un sensibile aumento della concentrazione

| | | | | | | |
|---|--|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 36 DI 96 |

salina in falda. La portata di emungimento è stata quindi aumentata sino a ottenere il sollevamento sino alla base del pozzo della isoalina corrispondente a 1g/l, che qui si ritiene quale condizione teorica limite.

Nelle Figure 5.7 e 5.8 è riportato l'output del calcolo, in termini di distribuzione di salinità, rispettivamente per il pozzo PC9 e PC13, ad 1 anno dalla messa in opera dell'emungimento, considerando per entrambi una portata costante nel tempo, pari rispettivamente a 0,4 l/s nel PC9 (depressione 0,04 m) e 0,05 l/s nel PC13 (depressione 0,25 m). Dopo un periodo di tempo pari a 1 anno si osserva la quasi stabilizzazione della concentrazione salina nel caso del piezometro PC9, mentre nel piezometro PC13 prosegue l'aumento di concentrazione salina (Figura 5.9). Nel caso del piezometro PC13, l'emungimento non può quindi proseguire oltre un anno o comunque dopo l'aver osservato un significativo incremento della concentrazione salina.

Il calcolo evidenzia quindi che, localmente, in relazione agli esiti di prove di permeabilità che dovranno essere eseguite nei pozzi, potrà essere aumentate o ridotte le portate, in relazione alle locali condizioni di idrogeologiche. Va infine osservato che le portate di emungimento potranno subire variazioni durante l'esercizio dei pozzi in relazione agli esiti del previsto monitoraggio idrogeologico in corso d'opera, sia in termini di aumento sia di riduzione della portata. La riduzione di portata in un pozzo dovrà essere applicata all'osservazione di un incremento di concentrazione salina nel pozzo. Un aumento di portata potrà essere accettato ove si rilevino valori accettabili di concentrazione salina nel tempo (meno di 1 g/l) e stabilità della posizione dell'interfaccia. Questa situazione può risultare possibile in quanto nelle simulazioni non si è tenuto conto di alcune circostanze, e in particolare:

- risulta probabile che il coefficiente di permeabilità si riduca con la profondità;
 - risulta probabile che la permeabilità orizzontale sia significativamente superiore a quella verticale.
- Entrambe le ipotesi anzidette determinano un significativo incremento della portata critica rispetto a quanto qui calcolato.

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 37 DI 96 |

6. VALUTAZIONI QUANTITATIVE RIGUARDANTI LE MODIFICHE DELLA MORFOLOGIA DELLA SUPERFICIE DI FALDA DURANTE L'ESERCIZIO DEL SISTEMA DI POZZI

Al fine di valutare la modifica della morfologia della superficie piezometrica della falda determinata dal sistema di pozzi previsti in progetto, sia in emungimento sia in immissione, sono state eseguite simulazioni numeriche con il metodo degli elementi finiti, adottando il codice di calcolo SUTRA. Le simulazioni sono state eseguite in condizioni di moto piano, nell'ambito del piano orizzontale. Si assume quindi che la velocità di filtrazione possa assumere solo direzione orizzontale. Si trascurano quindi le componenti verticali del moto. La porzione di acquifero esaminata è stata definita tale da comprendere al suo interno l'area di pertinenza della stazione ferroviaria e comunque tale che, ai bordi del modello, possano ritenersi trascurabili gli effetti indotti dall'emungimento e della immissione, in quanto trattasi di bordi non fisicamente esistenti (Figura 5.10). Il modello geometrico è stato discretizzato in elementi di forma triangolare con area media pari a circa 25 m².

Le simulazioni numeriche sono state eseguite sia in ipotesi eterogeneità in termini di coefficiente di permeabilità, sia in ipotesi di omogeneità. In quest'ultimo caso, è stato assunto un coefficiente di permeabilità pari al valore medio ottenuto applicando la formula di De Glee (cfr. paragrafo 4.1).

In ipotesi di mezzo eterogeneo, si è proceduto a calibrare il modello adottando una procedura semplificata. In particolare, partendo dalle prove di emungimento eseguite, è stato variato, per ciascun pozzo, il relativo coefficiente di permeabilità, sino ad ottenere un legame portata - depressione prossimo a quello misurato in sito. La suddetta calibrazione è del tutto simile a quella già illustrata nel paragrafo precedente quale attività preliminare per la simulazione del fenomeno della formazione del cono di intrusione marina (Figura 5.6). Essa ha fornito valori del coefficiente di permeabilità leggermente differenti, a causa delle diverse ipotesi fatte circa le condizioni di moto, che sono assialsimmetriche per l'analisi dell'upconing saltwater e piane orizzontali per le analisi di cui al presente paragrafo. Per i due piezometri precedentemente considerati, il PC9 ed il PC13, si ottiene una buona

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 38 DI 96 |

approssimazione delle prove di sito riducendo uniformemente i valori di permeabilità rispetto al caso assialsimmetrico, sino a raggiungere per il PC9 e per il PC13 rispettivamente valori pari a $3,4 \times 10^{-4}$ m/s e $1,0 \times 10^{-6}$ m/s. Analoga procedura è stata eseguita per tutte le altre verticali per le quali si dispone di prove di emungimento. In Figura 5.11 è riportata la carta con la distribuzione del coefficiente di permeabilità ottenuto per interpolazione.

La morfologia della superficie piezometrica nello stato di fatto è stata ricostruita imponendo delle condizioni al contorno del modello tali da riprodurre, con buona approssimazione, quanto misurato in sito. In particolare, si è fatto riferimento alla superficie piezometrica rilevata il 16/04/2014 alle ore 7.00-8.00 (Figura 4.20). Tale risultato è stato ottenuto imponendo ai bordi del modello carichi idraulici H, pari a 0,75 m s.l.m. al bordo S-O e 0,15 al bordo N-E (Figura 5.12). Data la suddetta condizione di partenza, è stata condotta una analisi in condizione stazionaria attivando, in prossimità dei pozzi, nodi della maglia di calcolo in cui sono state imposte condizioni di flusso in uscita (pozzi di emungimento "Px") ed in ingresso (pozzi di immissione "Ix"). Alla luce delle considerazioni e delle analisi svolte e precedentemente presentate in merito al fenomeno dell'upconing, la simulazione è stata eseguita distinguendo le portate di emungimento in relazione alla permeabilità locale. Le portate di immissione sono state invece assunte costanti, fermo restando la necessità di eseguite prove di immissione in corso d'opera. Nello specifico, sono state assegnate le seguenti portate:

pozzi da P1 a P8: portata di emungimento pari a 0,4 l/s;

pozzi da P9 a P15: portata di emungimento pari a 0,05 l/s;

pozzi da I1 a I8: portata in immissione pari a 0,4 l/s; pozzi

da I9 a I15: portata in immissione pari a 0,05 l/s.

Come si evince in Figura 5.13, le linee equipotenziali subiscono un sollevamento a monte e un abbassamento a valle, più pronunciati ove la permeabilità è inferiore. Ove la permeabilità è elevata, l'impatto è quasi nullo. Ove la permeabilità è inferiore, l'impatto del sistema di pozzi si va comunque riducendo, sino a diventare quasi nullo a una distanza dalla stazione ferroviaria quasi pari a 300 m. Si evidenzia come il sistema di pozzi determini, localmente, una deviazione della direzione del flusso

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 39 DI 96 |

idrico, che tende a diventare perpendicolare alle direttrici che uniscono i pozzi di emungimento e i pozzi di immissione, con verso diretto dai pozzi di immissione a quelli di emungimento.

Una ulteriore simulazione è stata eseguita assumendo per l'acquifero un mezzo omogeneo, con coefficiente di permeabilità pari al valore medio ottenuto applicando la relazione di De Glee (paragrafo 4.1; Figura 4.9), ossia $k=3 \times 10^{-4}$ m/s, adottando lo stesso metodo prima descritto. In Figura 5.14 è illustrato il risultato ottenuto, che evidenzia un impatto minimo sulla circolazione idrica sotterranea.

7. CONCLUSIONI

Nell'ambito degli interventi previsti per la bonifica e messa in sicurezza dell'area della stazione ferroviaria di FSE di Bari, il progetto prevede la realizzazione di un sistema di emungimento delle acque di falda, trattamento delle stesse in specifico impianto TAF e reimmissione in falda.

Sono stati previsti n. 15 pozzi in estrazione e n. 15 pozzi in immissione, distribuiti lungo i confini di valle e di monte del sito, a una distanza reciproca di circa 30-40 m, profondi 10 m e penetranti in falda per circa 5-6 m. In particolare, è stato previsto che il trattamento della falda, della durata di un anno, dovrà interessare almeno un volume di acqua sotterranea pari a circa 110.000 mc, ossia all'incirca 2 volte il volume di acqua sotteso dall'area del sito, quest'ultimo determinato ipotizzando una porosità dell'acquifero carbonatico pari al 5% ed uno spessore di falda pari a circa 20 m ($55.000 \text{ m}^2 \times 20 \text{ m} \times 5\% = 110.000 \text{ mc}$). La portata così determinata corrisponde ad una portata media annua per singolo pozzo pari a 0,23 l/s e ad una portata totale da trattare nell'impianto TAF pari a circa 12 mc/h.

Al fine di verificare la fattibilità del sistema di pompaggio/immissione previsto, è stato definito un modello concettuale della circolazione idrica sotterranea e le possibili variabilità che sarà possibile incontrare in corso d'opera. Attraverso le indagini e studi eseguiti, è stato possibile:

- valutare la possibilità di assimilare la formazione calcarea, fratturata e carsicizzata, a un mezzo poroso equivalente e l'applicabilità della legge di Darcy;

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 40 DI 96 |

- determinare la variabilità attesa in termini di coefficiente di permeabilità, da verificare in corso d'opera; in particolare, il coefficiente di permeabilità, alla scala del singolo piezometro, varia, in termini di ordine di grandezza, da circa 10^{-3} m/s a circa 10^{-6} m/s;
- determinare la morfologia della superficie piezometrica, la quale, pur subendo modifiche durante la giornata in relazione, principalmente, alla propagazione delle oscillazioni di marea sui livelli di falda, conserva i caratteri fondamentali, ossia la direzione e verso della falda (SO-NE) e l'ordine di grandezza della cadente piezometrica (mediamente 1‰);
- verificare che l'acquifero è interessato dal fenomeno dell'intrusione marina. In particolare, la lente di acqua dolce presenta uno spessore dell'ordine di 20 m, con una zona di transizione alla sottostante acqua di mare dell'ordine di 10-15 m;

Le simulazioni numeriche eseguite con il metodo degli elementi finitivi, hanno consentito:

- a) di verificare gli impatti determinati in termini di modifica delle condizioni di equilibrio esistenti tra la falda di acqua dolce e la sottostante acqua di mare; in particolare è stato analizzato il fenomeno del saltwater upconing;
- b) di verificare gli impatti potenziali determinati sulla morfologia della superficie piezometrica dal sistema di estrazione/immissione previsto.

Le valutazioni eseguite in fase di progettazione definitiva, che dovranno essere verificate nelle successive fasi operative, per quanto attiene il punto a), in ipotesi di mezzo poroso equivalente avente permeabilità pari al valor medio riscontrato in sito, risulta possibile adottare una portata di emungimento pari a quella media prevista dal sistema di pompaggio (0,23 l/s), senza determinare significative modifiche della salinità delle acque di falda. In ipotesi di permeabilità inferiore, e in particolare assumendo il valore minimo riscontrato in sito, la massima portata estraibile per la durata di un anno risulta essere pari a circa 0,05 l/s; in dette condizioni, proseguendo il pompaggio oltre un anno, si avrebbe la progressiva salinizzazione delle acque di falda, sino a raggiungere valori di diversi g/l.

Le valutazioni eseguite con riferimento al fenomeno del saltwater upconing, sono comunque da ritenersi approssimate, in quanto:

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 41 DI 96 |

- non si è tenuto conto della presenza di pozzi in immissione, che mitigano il fenomeno del saltwater upconing;
- non si è tenuto conto di particolari anisotropie (permeabilità orizzontale maggiore di quella verticale) e eterogeneità (riduzione di permeabilità con la profondità), che potrebbero determinare condizioni maggiormente favorevoli all'estrazione;
- le altezze piezometriche al momento della realizzazione degli interventi potrebbero risultare differenti a quelle sinora rilevate, in relazione alle condizioni di ricarica della falda.

Quanto sopra indica la necessità di prevedere prove di portata nei pozzi da realizzare, prima del loro esercizio, al fine di determinare la più razionale distribuzione delle portate di emungimento tra i vari pozzi. Il monitoraggio in corso d'opera previsto consentirà di confermare le portate adottate o rivalutare le stesse singolarmente per ciascun pozzo, fermo restando la portata totale complessiva (12 mc/h). Con riferimento al punto b), analisi numeriche eseguite in condizioni di moto piano, hanno consentito di verificare che:

- in ipotesi di coefficiente di permeabilità alla scala del sito prossimo a quello medio, le modifiche che si determineranno sulle linee piezometriche saranno dell'ordine di pochi centimetri e si smorzano rapidamente all'aumentare della distanza dal sito;
- in ipotesi di eterogeneità nella distribuzione del coefficiente di permeabilità, quanto sopra vale nelle zone ove è stata riscontrata localmente una maggior permeabilità; nelle zone ove la permeabilità risulta inferiore, potranno osservarsi sollevamenti/abbassamenti del livello di falda dell'ordine di pochi decimetri, che si smorzano a una distanza dell'ordine di alcune centinaia di metri dall'area in esame; - in ogni caso il sistema di emungimento/immissione determina, nell'area FSE, una modifica della direzione della circolazione idrica sotterranea che, durante l'esercizio, sarà diretta dai pozzi di immissione a quelli di emungimento; all'esterno dell'area FSE la direzione della circolazione idrica sotterranea subisce modeste modifiche.

Sulla base del modello concettuale sono stati quindi definiti i valori medi riguardanti le portate da emungere, i quali potranno subire variazioni in fase di progettazione operativa ed esecuzione dei lavori,

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 42 DI 96 |

entro i limiti indicati in progetto. Fermo restando gli obiettivi di bonifica già indicati dal progetto definitivo, in corso d'opera, in relazione alle prove di portata da eseguire sui pozzi e ai monitoraggi previsti, potranno essere apportate variazioni al sistema di emungimento e immissione; ciò dipenderà dalle locali condizioni idrogeologiche e alle condizioni di ricarica della falda nel periodo in cui saranno realizzati gli interventi, oltre che alla verifica dell'efficacia dell'intervento stesso da attuare attraverso uno specifico piano di monitoraggio.

La portata di emungimento potrà, pozzo per pozzo, subire modifiche in relazione alle locali condizioni idrogeologiche, tali che la portata complessiva risulti comunque rispettata. Nell'ipotesi in cui i caratteri di permeabilità locali dovessero essere tali da richiedere l'adozione di portate di emungimento modeste, anche in relazione a possibili fenomeni di interferenza tra pozzi, tali da non consentire il trattamento di 110.000 mc di acqua in un anno, si potrà prevedere, sentiti gli Enti Competenti, che il trattamento possa proseguire oltre 1 anno, al fine di trattare un volume pari ad almeno 110.000 mc, circostanza da valutare anche in relazione alle concentrazioni dei contaminanti raggiunte ai punti di conformità.

Per quanto riguarda i pozzi di immissione in falda, dopo la loro realizzazione, dovranno essere previste prove di assorbimento atte a verificare l'idoneità degli stessi in relazione alla portata media prevista in progetto, in funzione delle locali condizioni idrogeologiche.

| | | | | | | |
|---|-------------------------------|-------------|---------------------|---------------------------|-----------|--------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 43 DI 96 |

FIGURE

APPALTATORE:
D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI
GENERALI s.r.l.

RIASSETTO NODO DI BARI

PROGETTISTA:

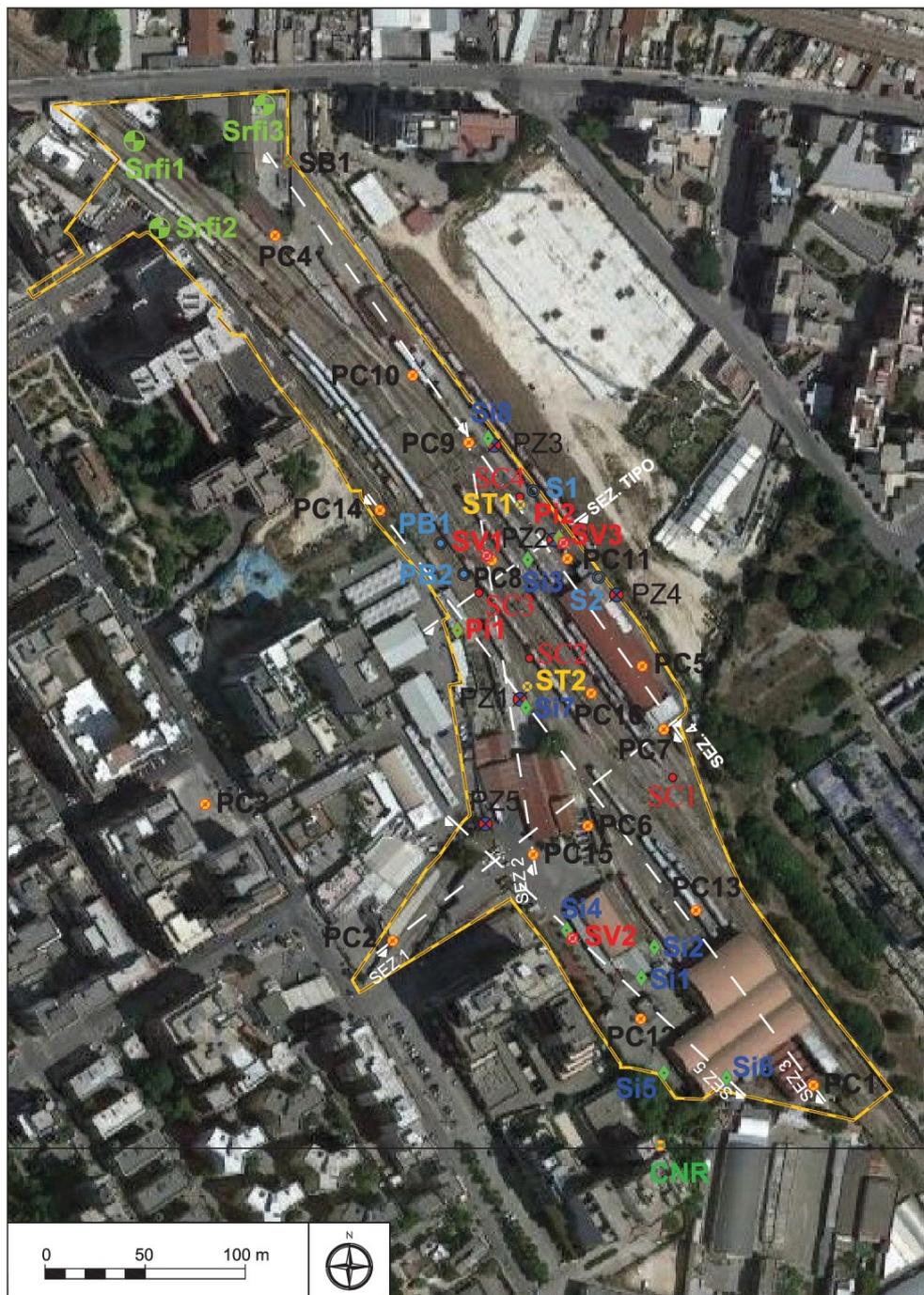
TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA
BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE

Mandataria: Mandante:

RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl

PROGETTO ESECUTIVO:
IM – Variante Ambientale
Relazione idrogeologica e di calcolo sulle
condizioni idrauliche sotterranee

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|--------------|------|----------|
| IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 44 DI 96 |



| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 45 DI 96 |

Figura 1.1 Ubicazione dei sondaggi eseguiti durante le diverse campagne geognostiche

| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|--------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|--------------|---|----------|
| PROGETTISTA: Mandatara: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | | | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | <table border="1"> <thead> <tr> <th>PROGETTO</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IA3S</td> <td>01</td> <td>E ZZ RH</td> <td>IM.00.0.0001</td> <td>A</td> <td>46 DI 96</td> </tr> </tbody> </table> | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 46 DI 96 |
| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 46 DI 96 | | | | | | | | |

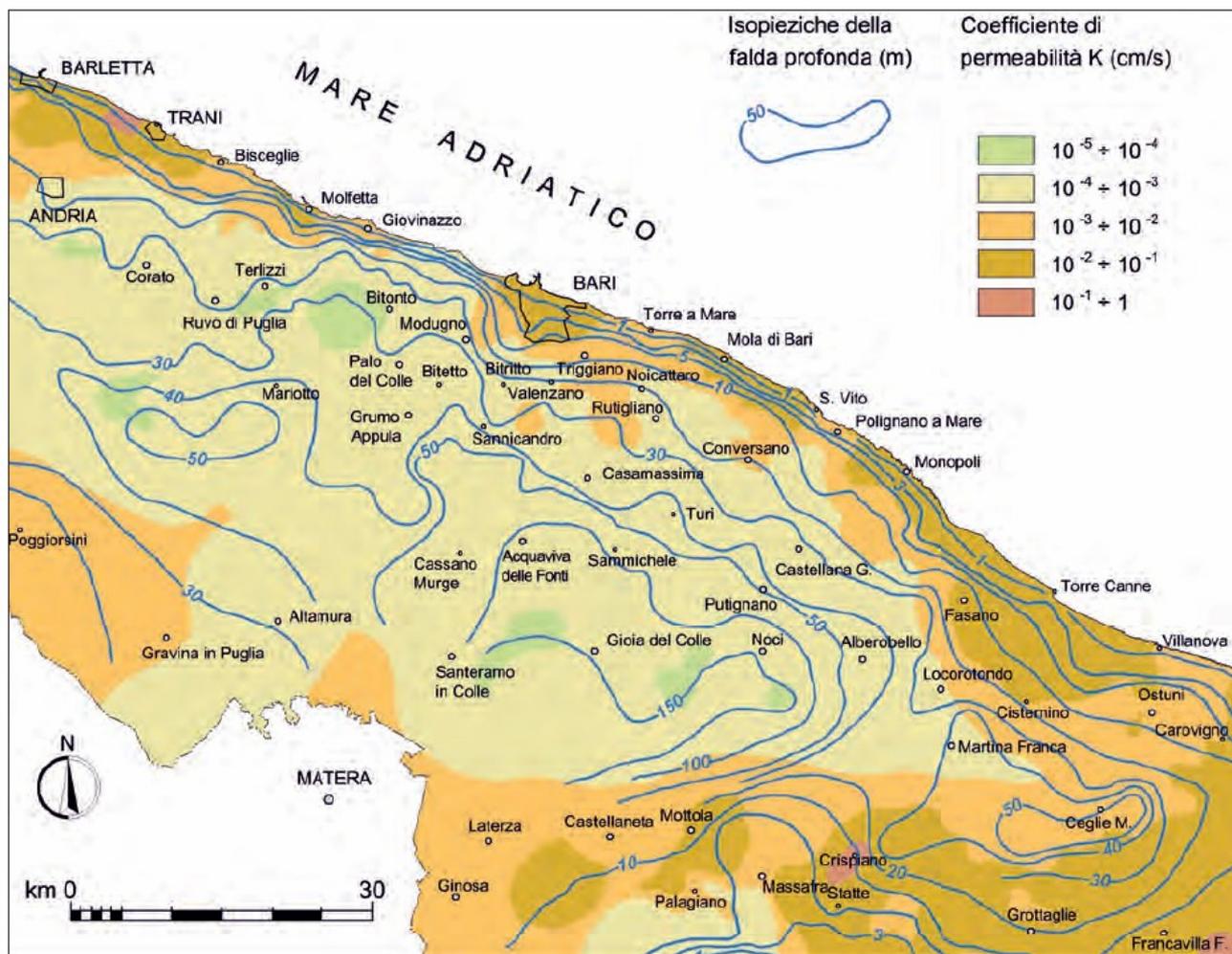


Figura 4.1 Isopieziche della falda idrica profonda e distribuzione del coefficiente di permeabilità dell'acquifero carbonatico appartenente all'area idrogeologica della Murgia (Cotecchia, 2014).

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 47 DI 96 |

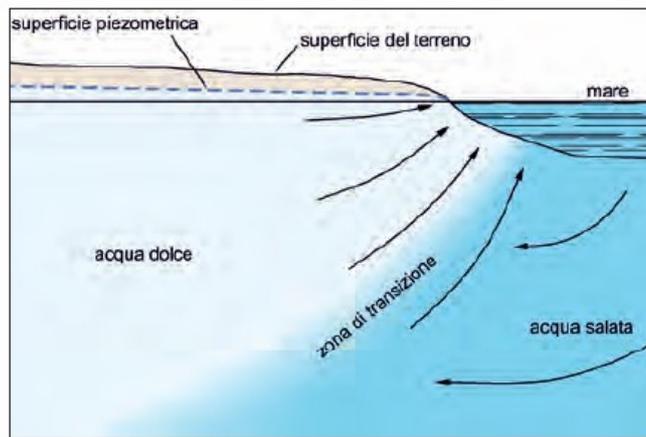


Figura 4.2 - Intrusione marina negli acquiferi costieri con indicazione della circolazione di acqua dal mare verso la zona di transizione e da questa di nuovo al mare.

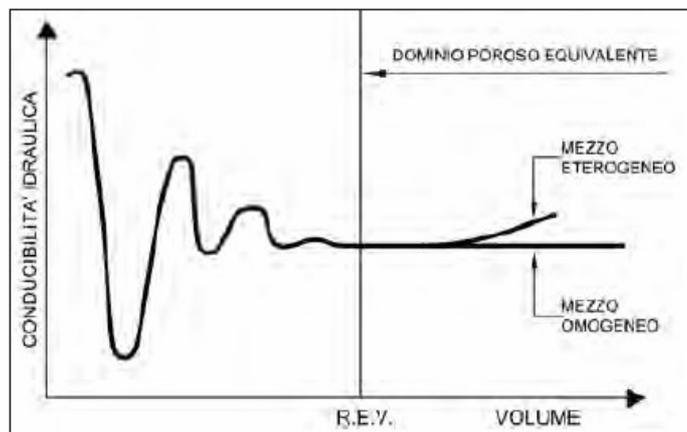


Figura 4.3 - Definizione del Volume Elementare Rappresentativo (REV) di un acquifero (da BEAR, 1979)

| | | | | | | |
|---|--|--------------|-----------------|---------------------|-------------|-----------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 48 DI 96 |

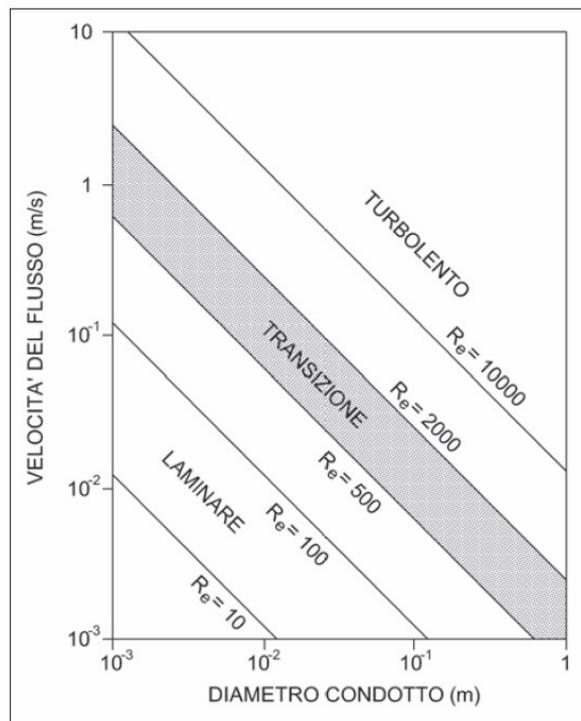


Figura 4.4 - Variazione del numero di Reynolds al variare della velocità del flusso e del diametro di un condotto circolare (da FORD & WILLIAMS, 2007)

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 49 DI 96 |

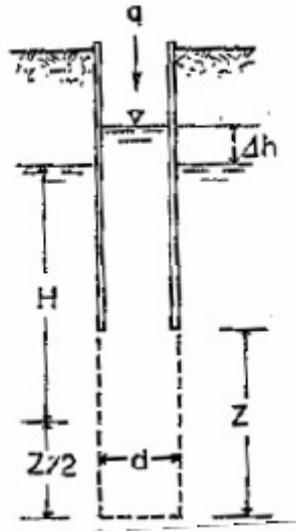


Figura 4.5 - Schema adottato per la prova di permeabilità tipo Lefranc a carico costante

| | | | | | | |
|--|---|-------------|---------------------|---------------------------|-----------|--------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatara: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 50 DI 96 |

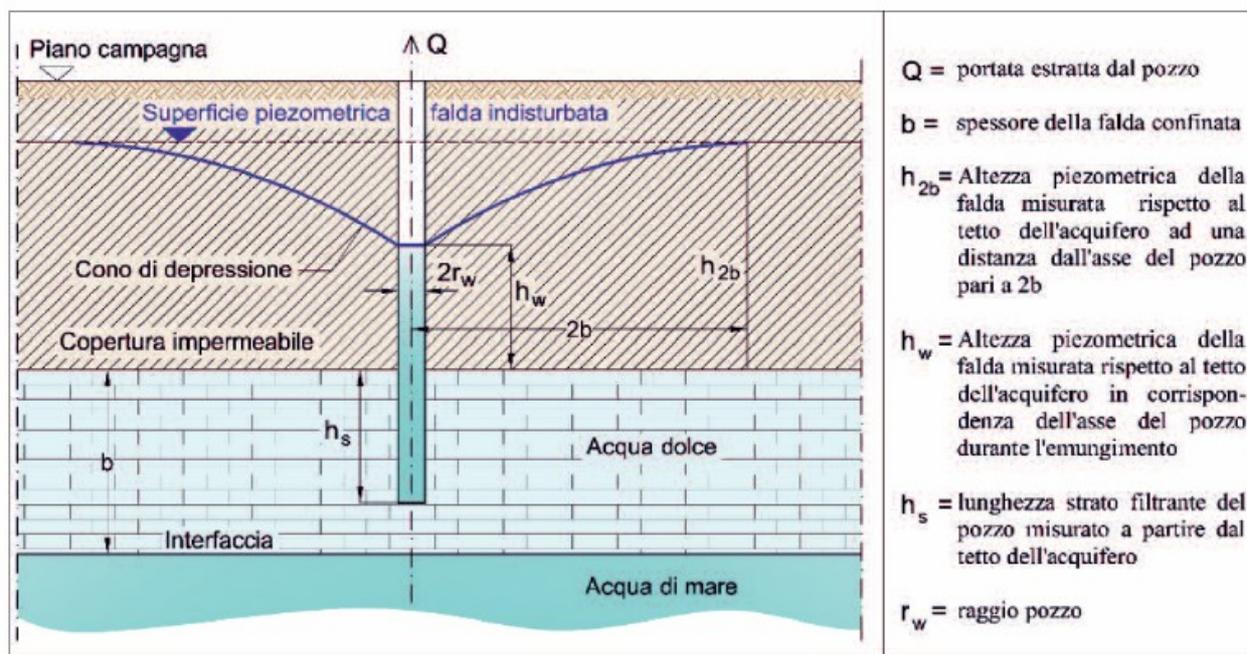
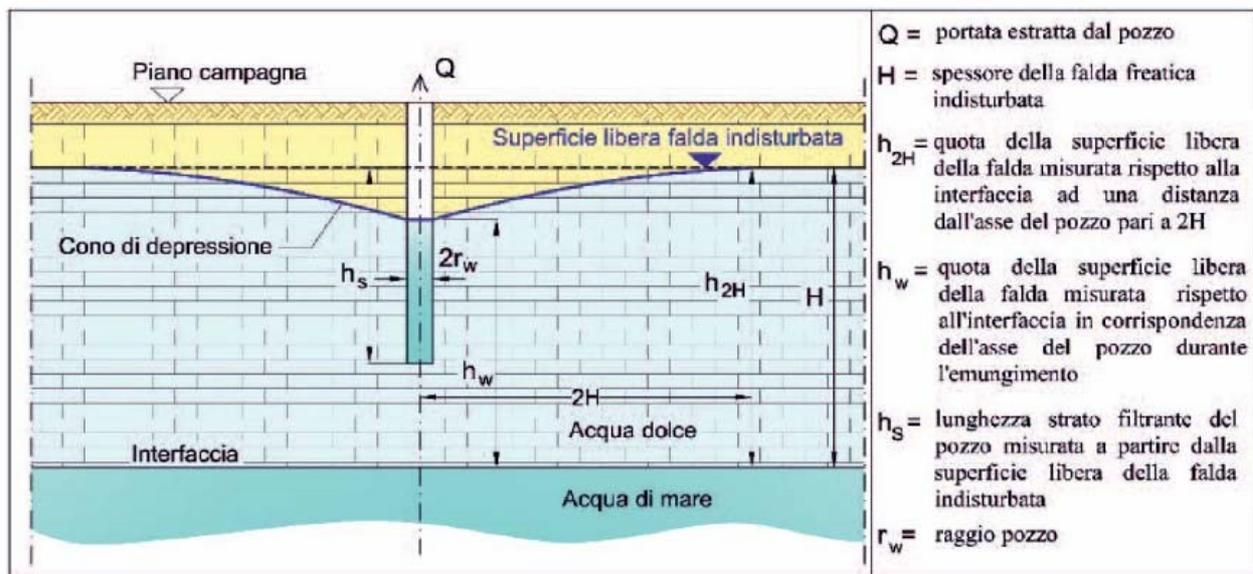
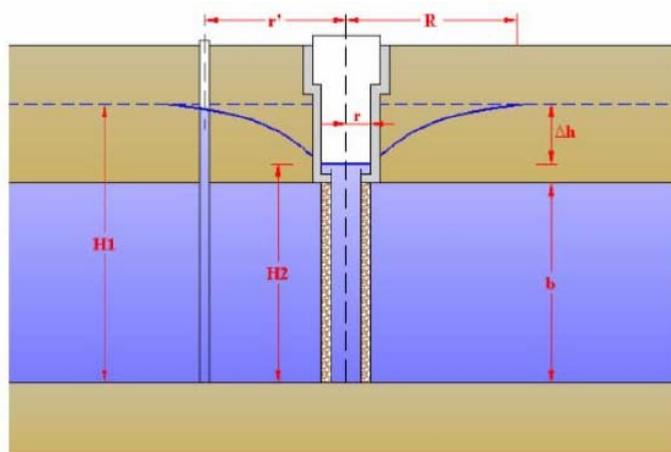
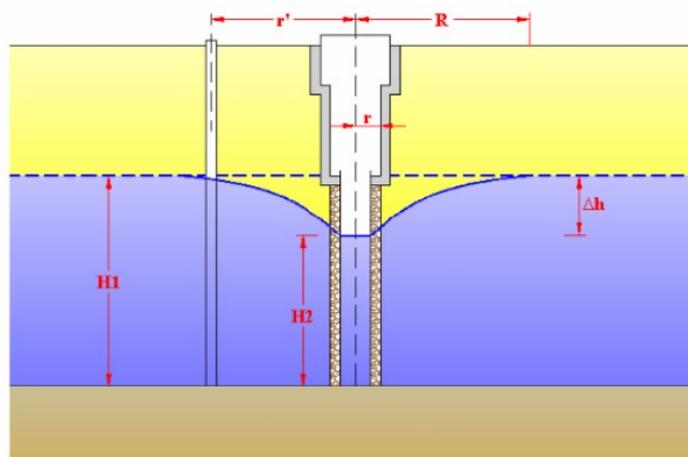


Figura 4.6 - Schema adottato per l'interpretazione delle prove di portata eseguite nell'acquifero fratturato carsico profondo con falda freatica (sopra) e falda confinata (sotto) con la formula di De Glee

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 51 DI 96 |



H_1 (m) = altezza della piezometrica indisturbata (*livello statico*) riferita al substrato impermeabile;
 H_2 (m) = altezza del *livello dinamico* dell'acqua nel pozzo in emungimento, riferita al substrato impermeabile.

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 52 DI 96 |

Figura 4.7 - Schema adottato per l'interpretazione delle prove di portata eseguite nell'acquifero fratturato carsico profondo con falda freatica (sopra) e falda confinata (sotto) con la formula di Dupuit

APPALTATORE:
D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI
GENERALI s.r.l.

RIASSETTO NODO DI BARI

PROGETTISTA:

Mandataria: Mandante:

RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl

TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA
BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE

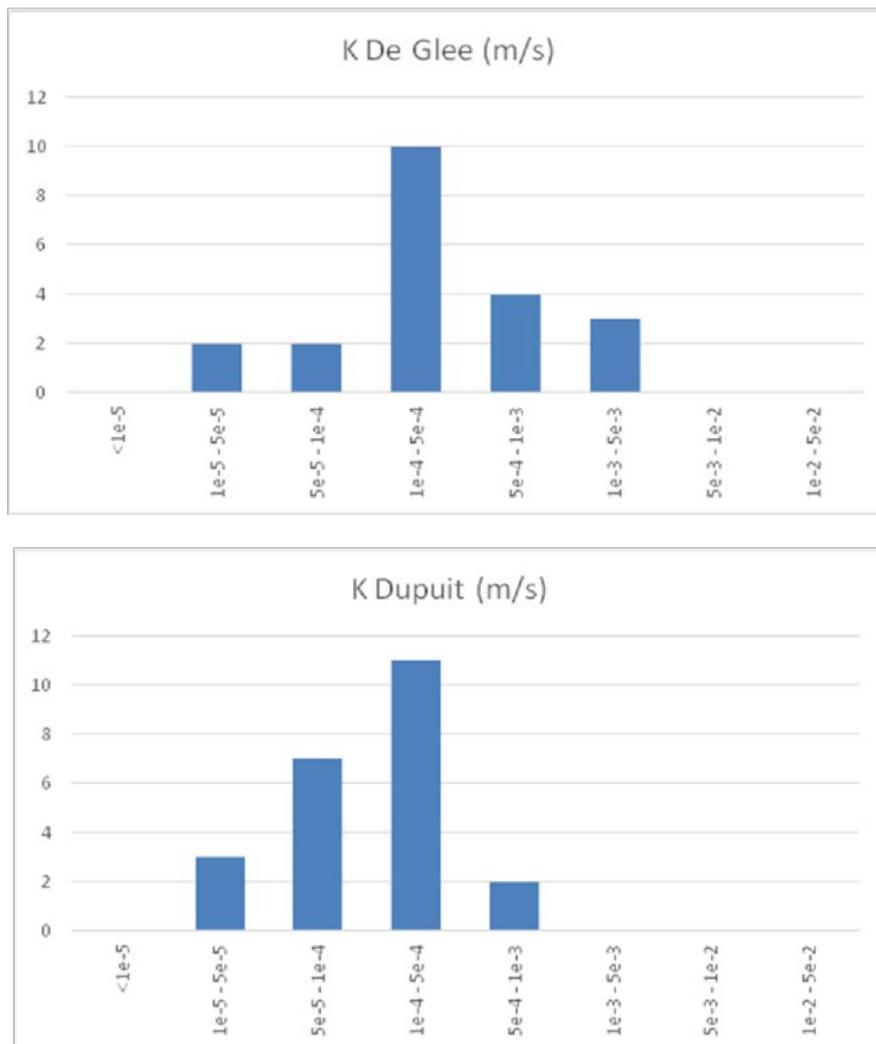
PROGETTO ESECUTIVO:
IM – Variante Ambientale
Relazione idrogeologica e di calcolo sulle
condizioni idrauliche sotterranee

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|--------------|------|----------|
| IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 53 DI 96 |



| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 54 DI 96 |

Figura 4.8 - Distribuzione dei valori del coefficiente di permeabilità dell'acquifero carbonatico profondo ottenuto con formule analitiche chiuse e interpolazione geostatistica



| | | | | | | |
|---|---|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 55 DI 96 |

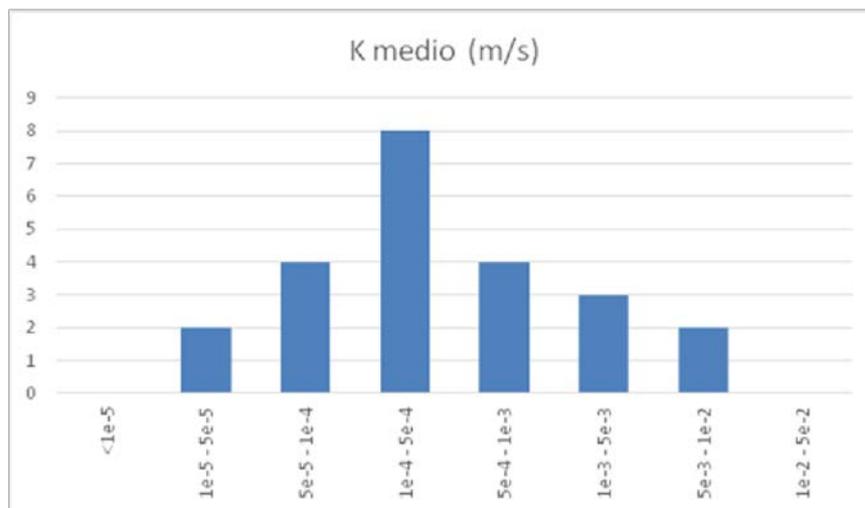
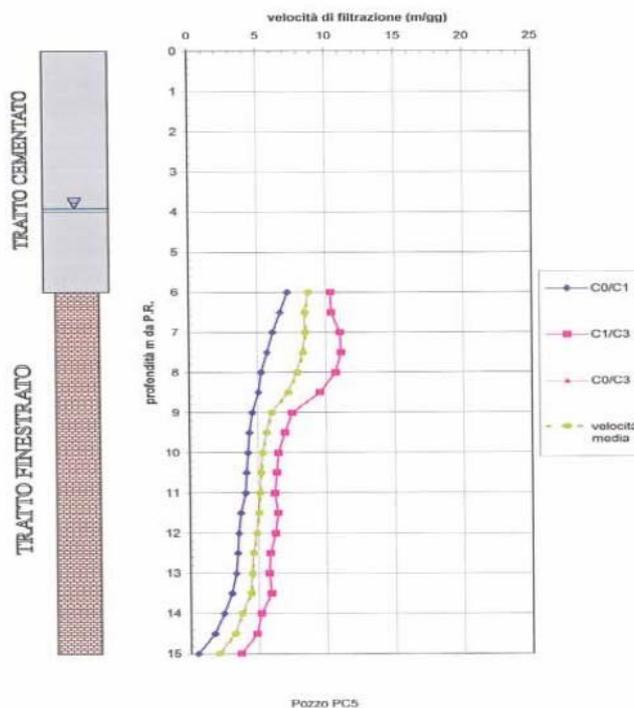


Figura 4.9 - Distribuzione frequenze coefficiente di permeabilità ottenuto con le formule di De Glee e Dupuit e relativo valore medio



| | | | | | | |
|---|---|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 56 DI 96 |

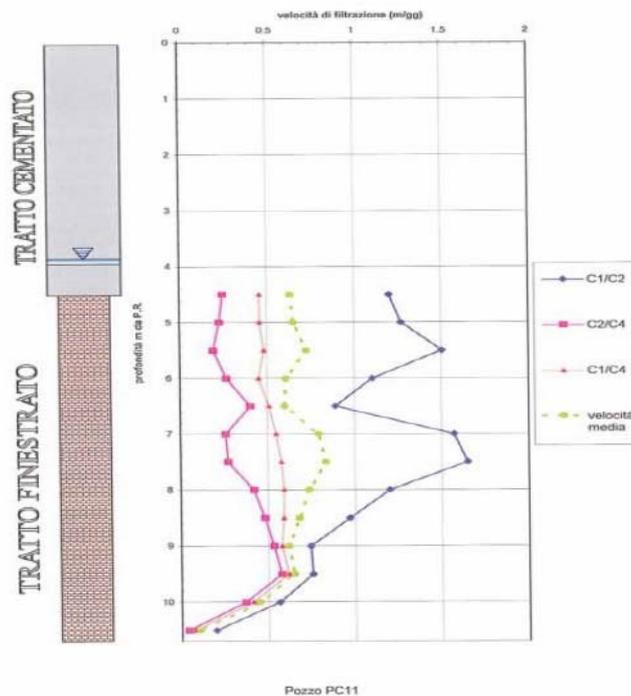
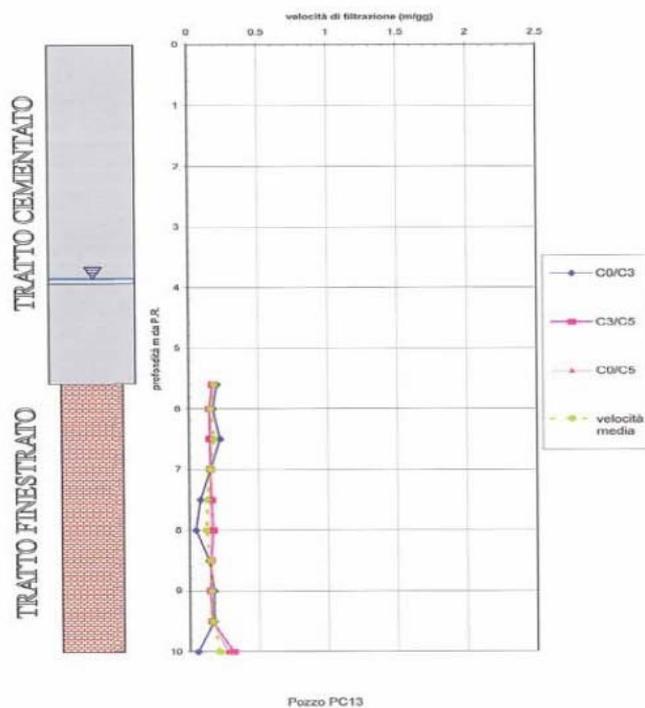


Figura 4.10 - Logs delle velocità medie di filtrazione misurate nei pozzi PC5 e PC11

| | | | | | | |
|---|---|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: <u> </u> Mandante: <u> </u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 57 DI 96 |



| | | | | | | |
|---|---|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 58 DI 96 |

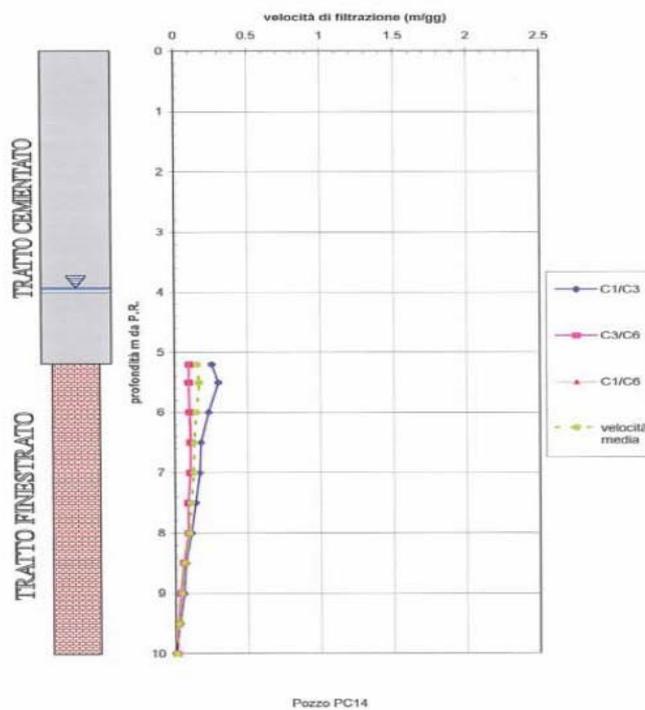


Figura 4.11 - Logs delle velocità medie di filtrazione misurate nei pozzi PC13 e PC14

| | | | | | | |
|---|---|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 59 DI 96 |

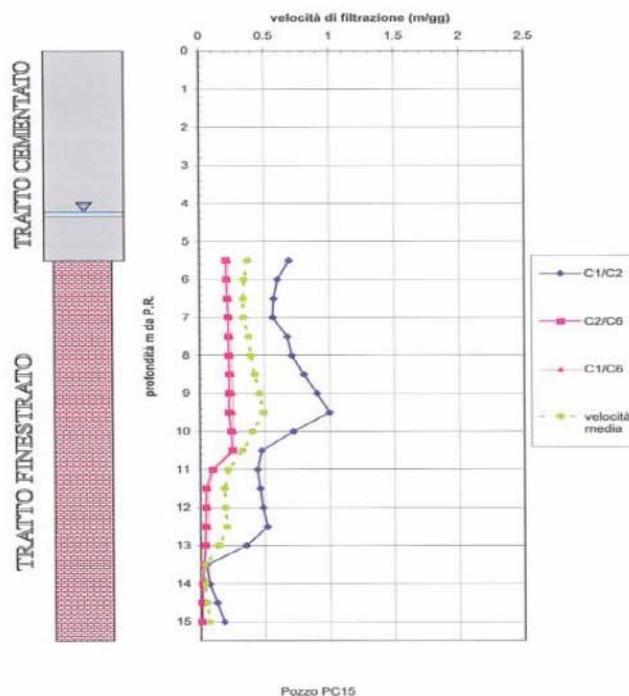


Figura 4.12 - Logs delle velocità medie di filtrazione misurate nel pozzo PC15

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatara: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 60 DI 96 |

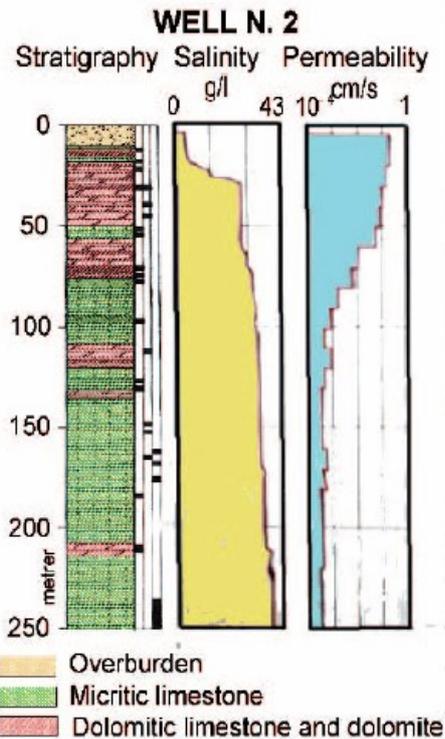


Figura 4.13 - Stratigrafia e profili di permeabilità e salinità in un pozzo storico della città di Bari (Cotecchia & Scuro, 2010)

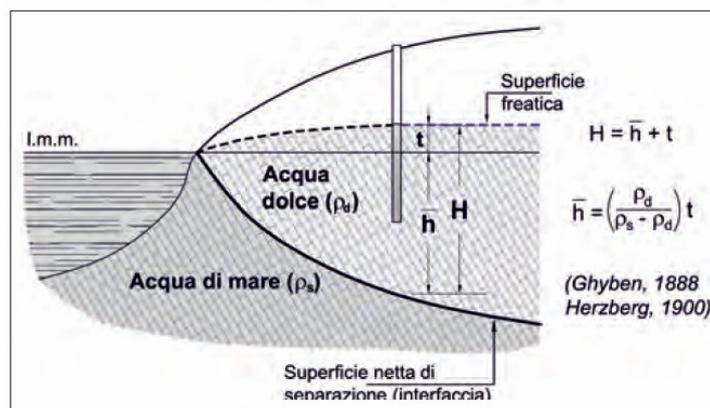


Figura 4.14 - Condizioni di equilibrio idrostatico tra una falda di acqua dolce freatica e l'acqua di mare intrusa nel continente: la relazione di Ghyben-Herzberg.

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 61 DI 96 |

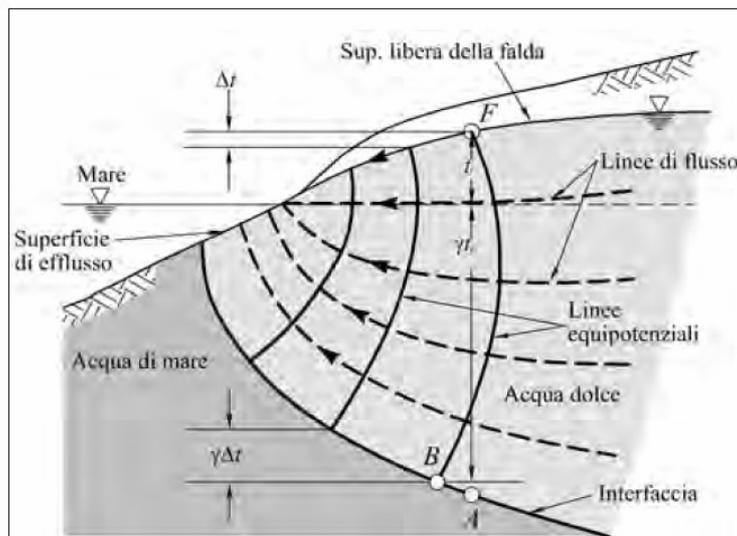
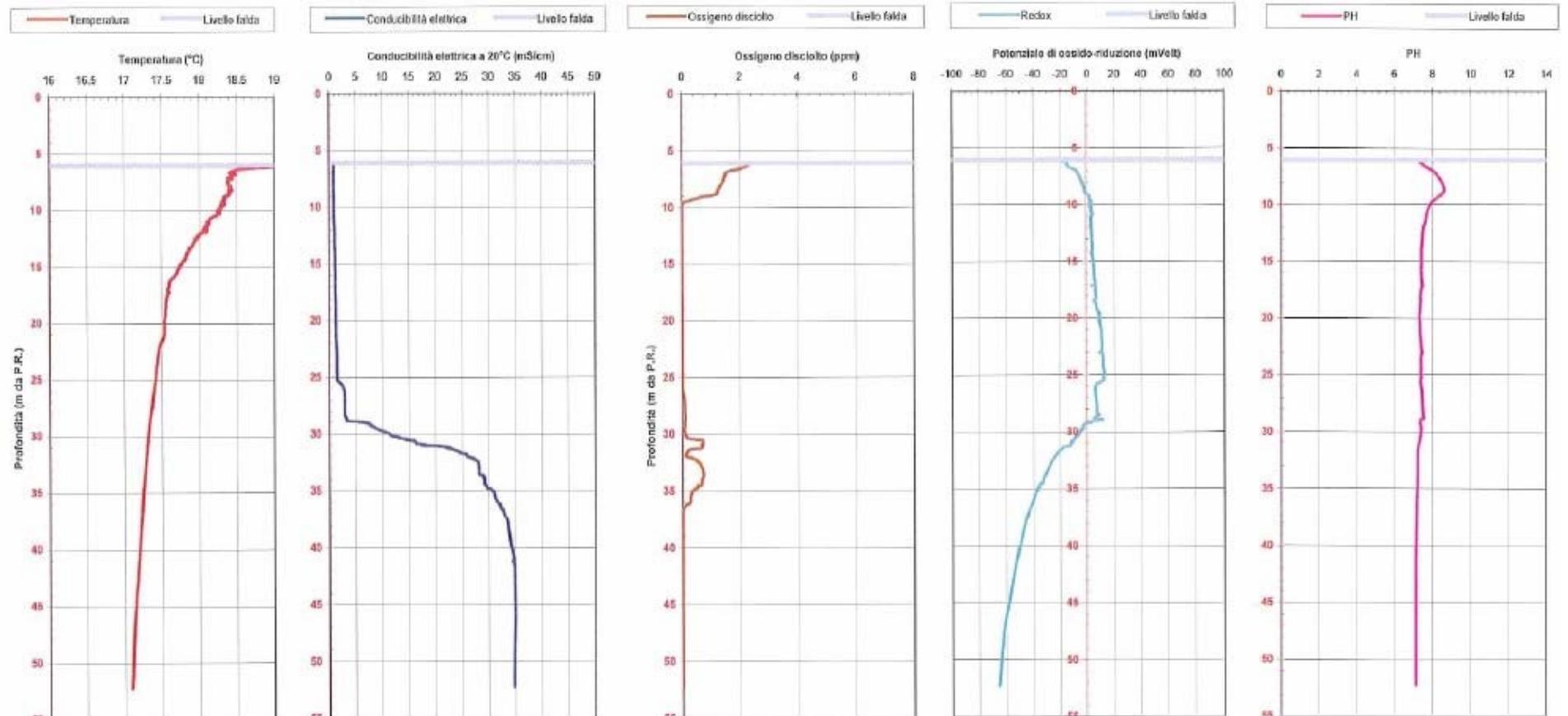


Figura 4.15 - Reticolo di flusso in prossimità della costa in presenza di una non trascurabile componente verticale della velocità di filtrazione: la profondità dell'interfaccia relativa al punto A è maggiore di quanto non si evinca dall'applicazione della relazione di Ghyben-Herzberg per la quale invece detta profondità dovrebbe essere quella del punto B (da BEER, 1979).

| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|--------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|--------------|---|----------|
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | | | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | <table border="1"> <thead> <tr> <th>PROGETTO</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IA3S</td> <td>01</td> <td>E ZZ RH</td> <td>IM.00.0.0001</td> <td>A</td> <td>62 DI 96</td> </tr> </tbody> </table> | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 62 DI 96 |
| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 62 DI 96 | | | | | | | | |

| | |
|---|---|
| <i>Identificazione punto indagine:</i> PC2 | |
| Livello statico: | 6.05 m da P.R. Data esecuzione indagine: 18-apr-14 |
| Altezza P.R. su P.C.: | 0 m Ora inizio attività: --- |
| Quota del P.R.: | N.D. m (Rif. IGM) Ora fine attività: --- |
| Prof. fondo foro reale: | 55 m Operatore/Sperimentatore: Sig. G. CAPRIGLIONE |

CAROTTAGGIO TERMICO E CONDUTTIMETRICO

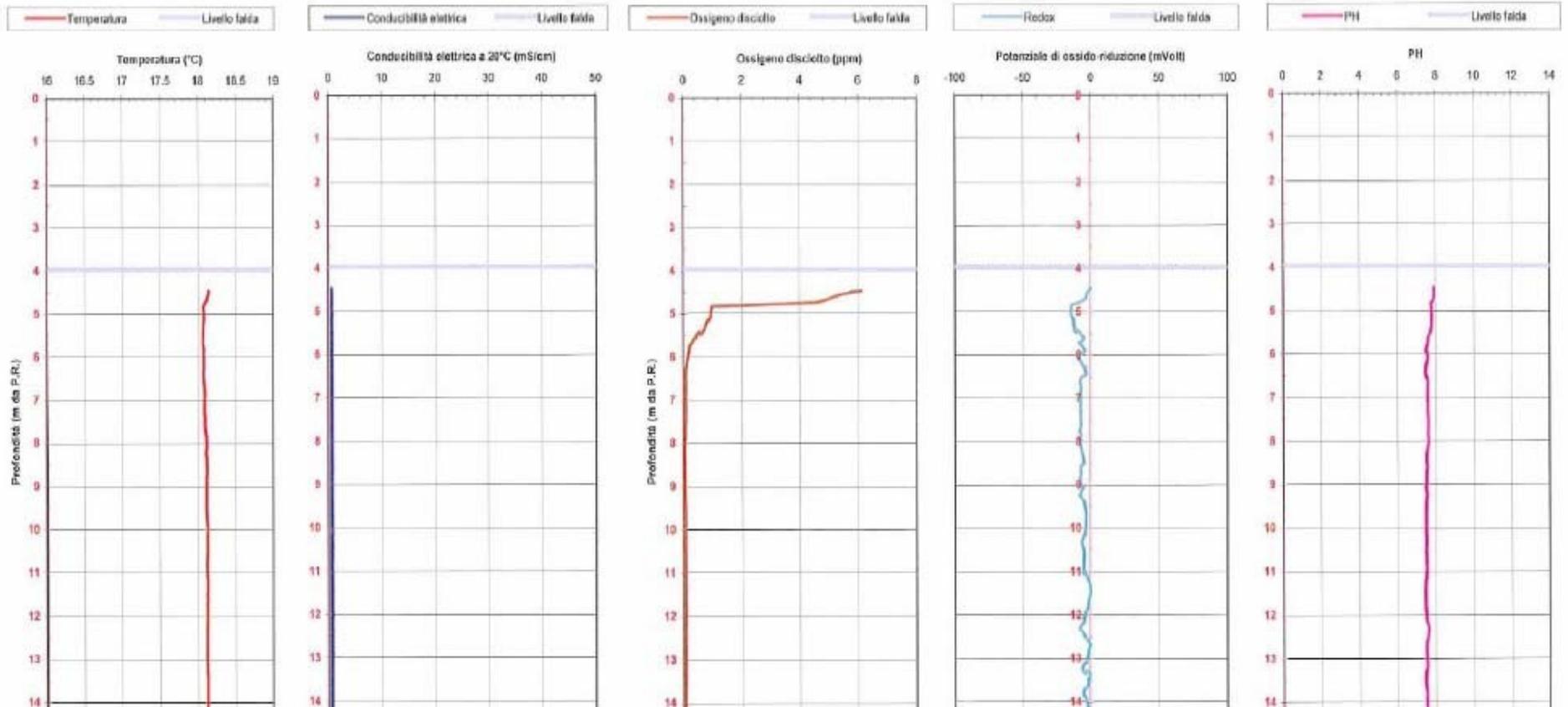


| | | | | | | |
|--|--|--------------|-----------------|---------------------|-------------|-----------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 63 DI 96 |

Figura 4.16 - Log multiparametrici eseguiti nel piezometro PC2 (Pozzo spia)

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 64 DI 96 |

| | |
|---|--|
| <i>Identificazione punto indagine:</i> PC5 | |
| Livello statico: | 3.97 m da P.R. Data esecuzione indagine: 22-apr-14 |
| Altezza P.R. su P.C.: | 0 m Ora inizio attività: --- |
| Quota del P.R.: | N.D. m (R.E. IGM) Ora fine attività: --- |
| Prof. fondo foro reale: | 15 m Operatore/Sperimentatore: Sig. G. CAPRIGLIONE |

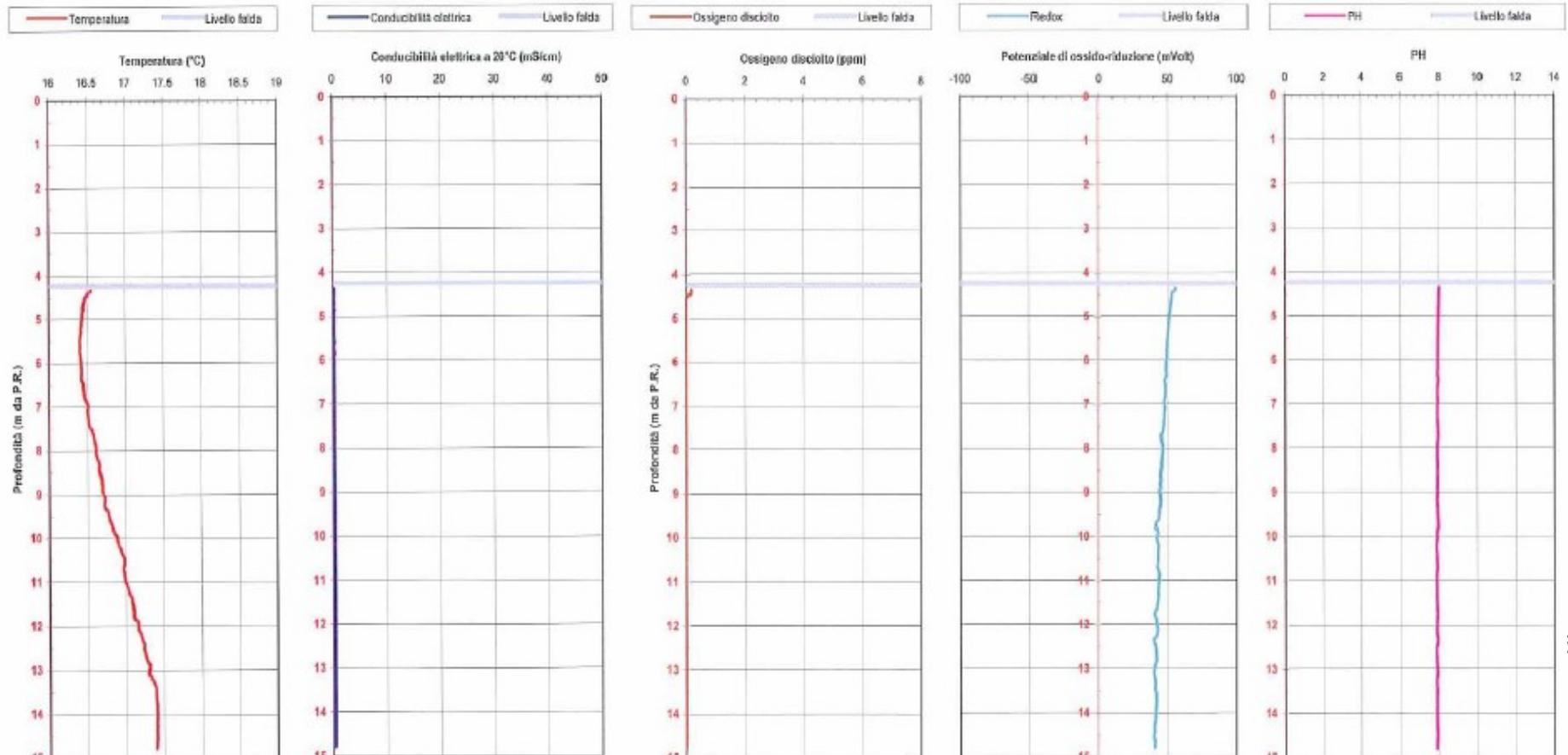


| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 65 DI 96 |

Figura 4.17 - Log multiparametrici eseguiti nel piezometro PC5

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 66 DI 96 |

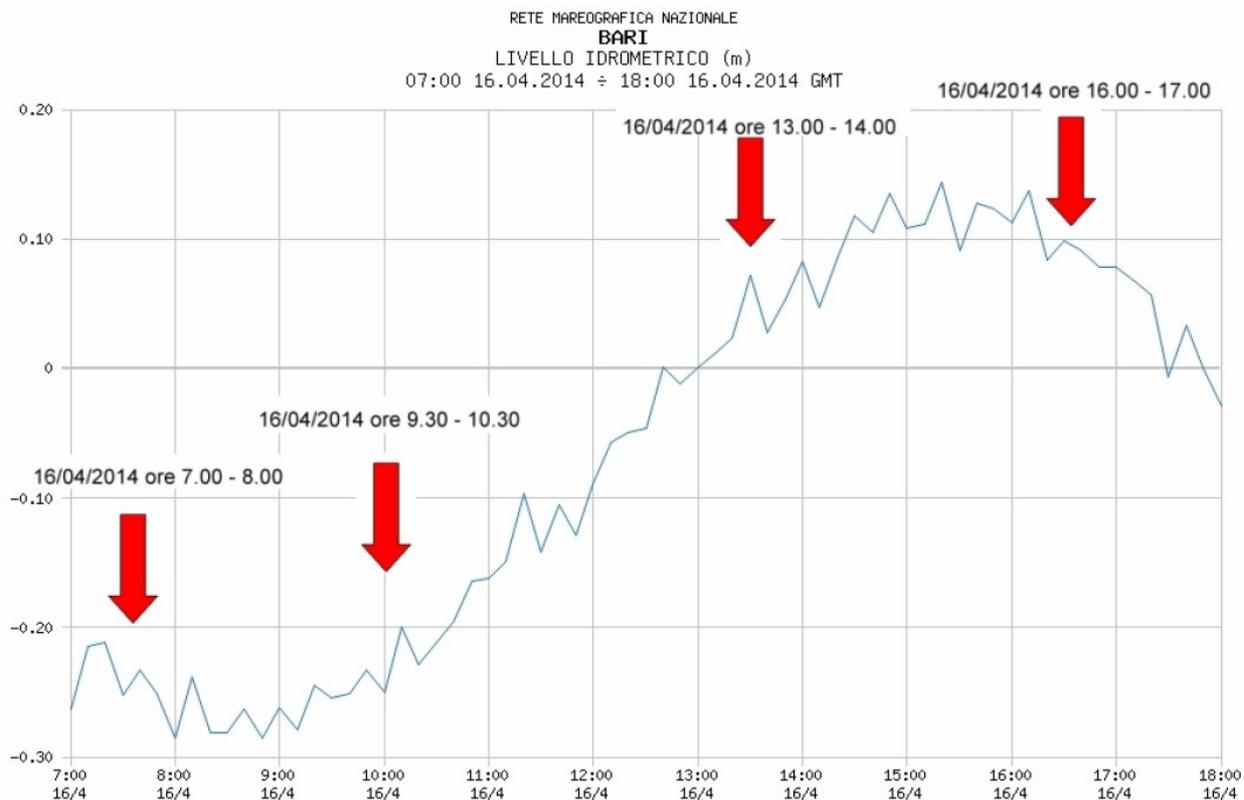
| | |
|--|---------------------|
| <i>Identificazione punto indagine:</i> PC15 | |
| Livello statico: | 4,24 m da P.R. |
| Altezza P.R. su P.C.: | 0 m |
| Quota del P.R.: | N.D. m (Rif. IGM) |
| Prof. fondo foro reale: | 15 m |
| Data esecuzione indagine: | 22-apr-14 |
| Ora inizio attività: | --- |
| Ora fine attività: | --- |
| Operatore/Sperimentatore: | Sig. G. CAPRIGLIONE |



| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 67 DI 96 |

Figura 4.18 - Log multiparametrici eseguiti nel piezometro PC15

| | | | | | | |
|--|---|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 68 DI 96 |



| | | | | | | |
|---|---|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 69 DI 96 |

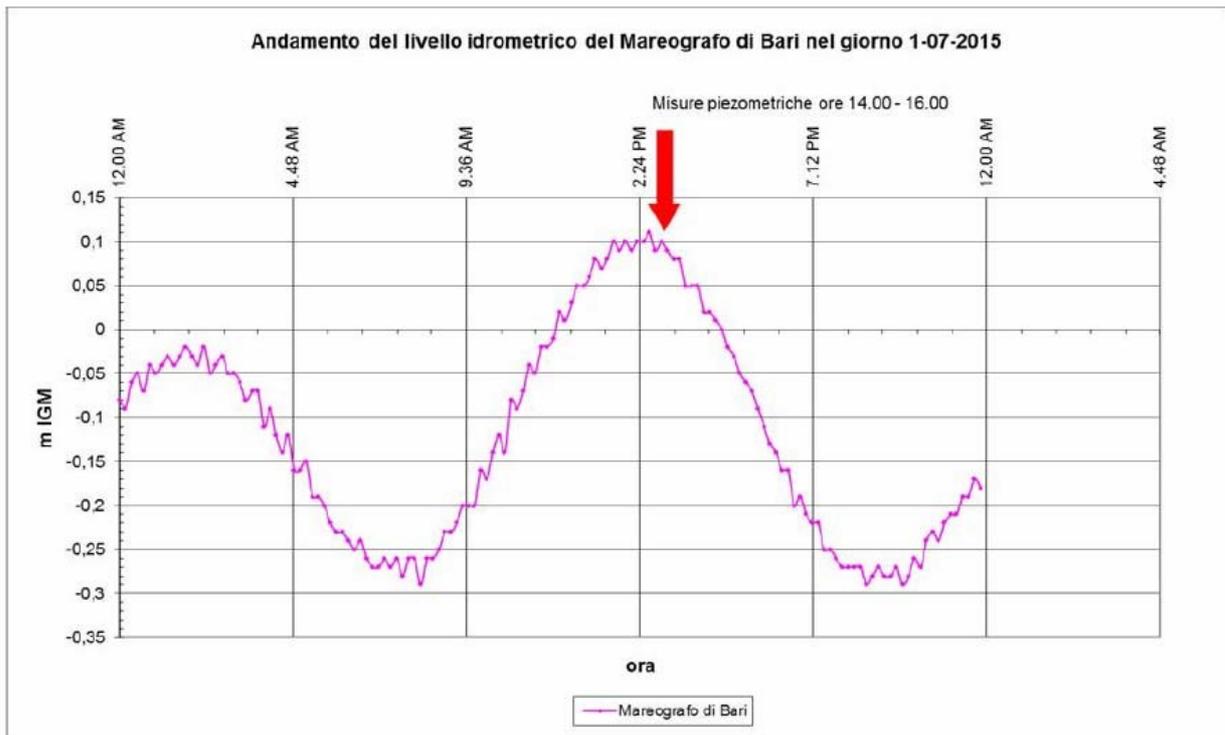
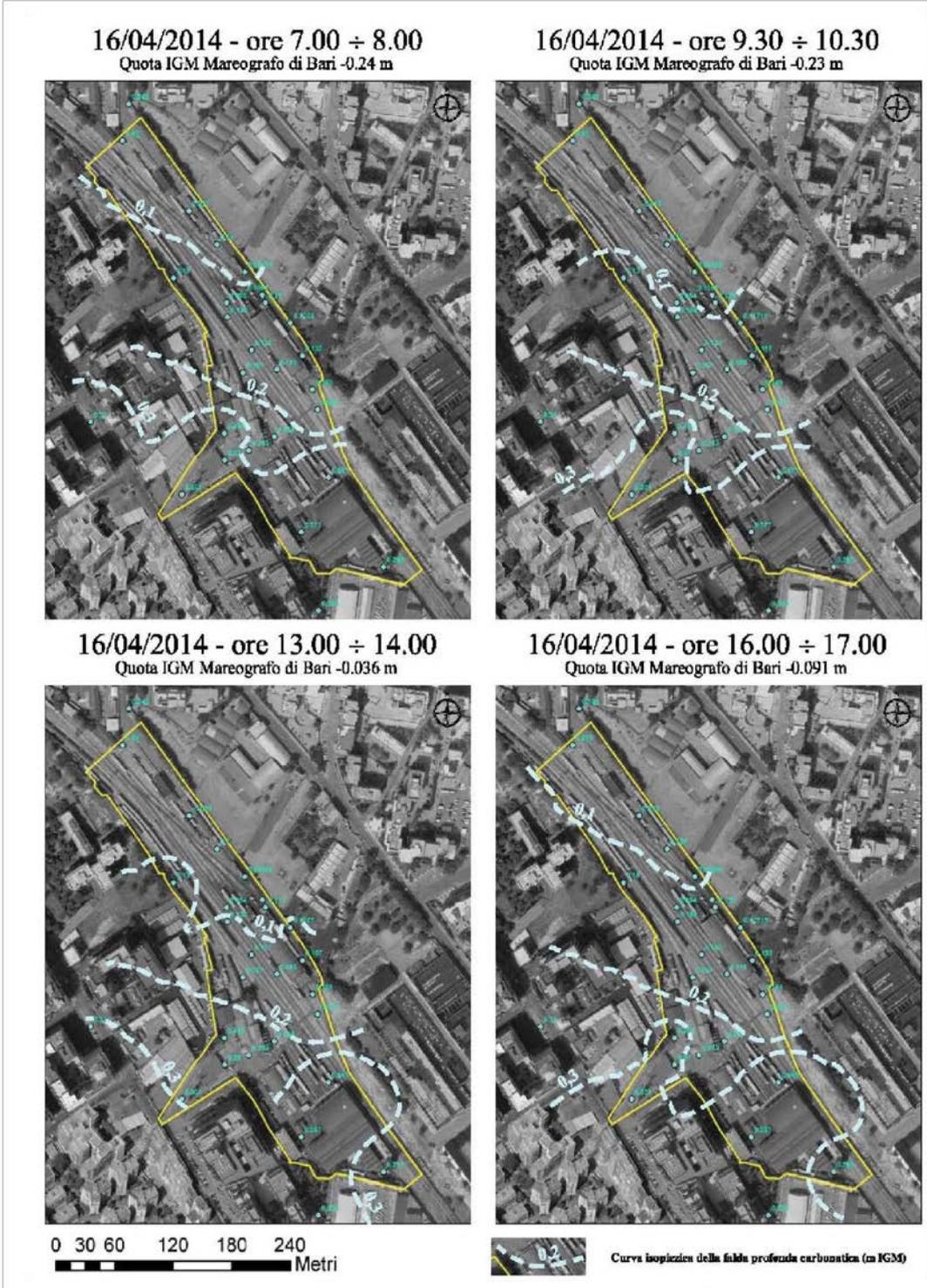


Figura 4.19 - Indicazione dei 4 intervalli di tempo in cui sono state condotti i rilievi piezometrici il giorno 16/04/2014 (sopra) e dell'intervallo di tempo in cui è stato eseguito il rilievo piezometrico il giorno 1/7/2015 (sotto), in relazione al livello idrometrico della stazione mareografica di Bari (www.mareografico.it).

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 70 DI 96 |



| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 71 DI 96 |

Figura 4.20 - Linee piezometriche determinate in diverse condizioni di marea (campagna piezometrica del 16 Aprile 2014)

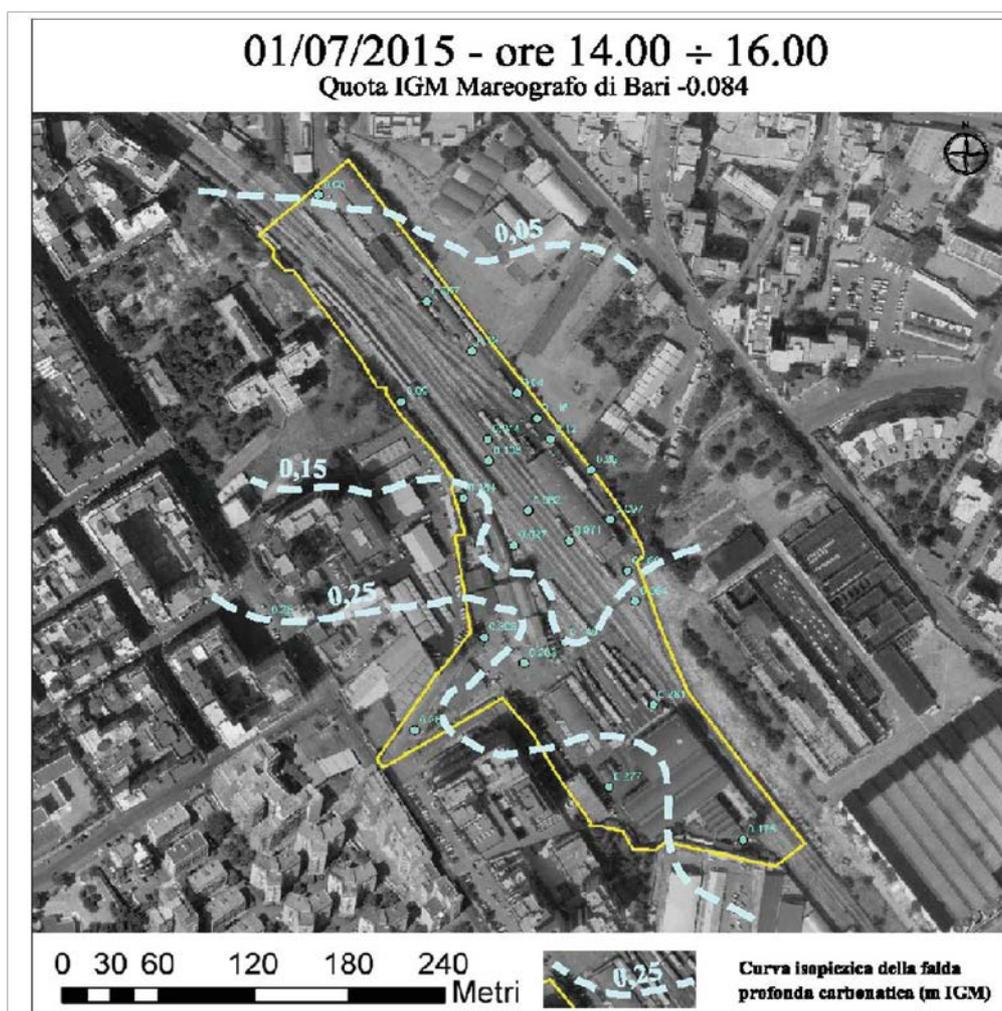


Figura 4.21 - Linee piezometriche determinate il giorno 1/7/2015

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatara: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 72 DI 96 |

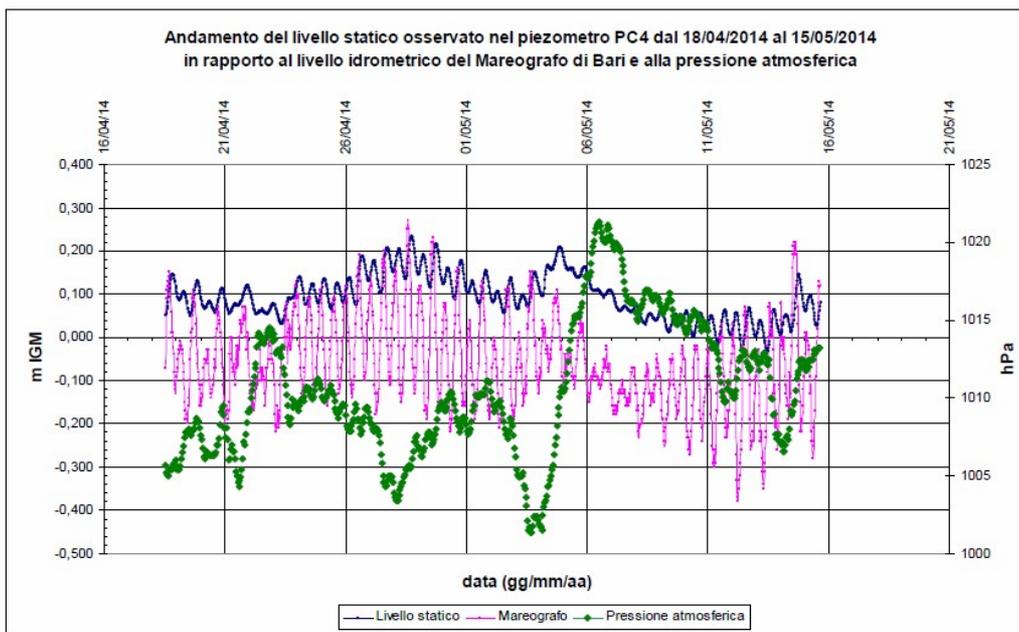


Figura 4.22 - Letture idrometrografiche nel piezometro PC4 e confronto con l'andamento delle maree e della pressione atmosferica

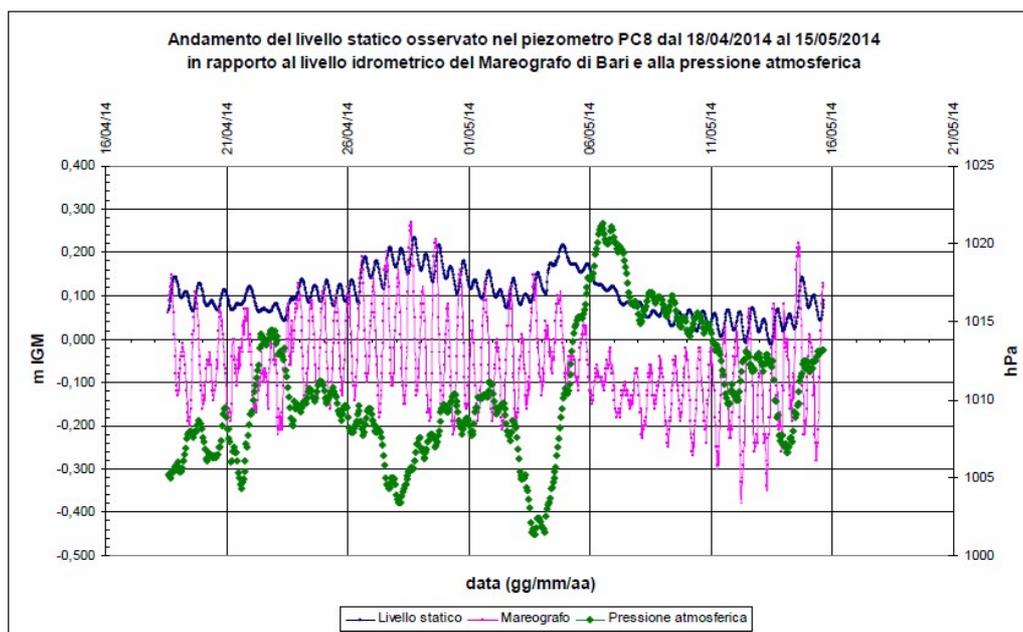


Figura 4.23 - Letture idrometrografiche nel piezometro PC8 e confronto con l'andamento delle

| | | | | | | |
|--|---|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 73 DI 96 |

maree e della pressione atmosferica

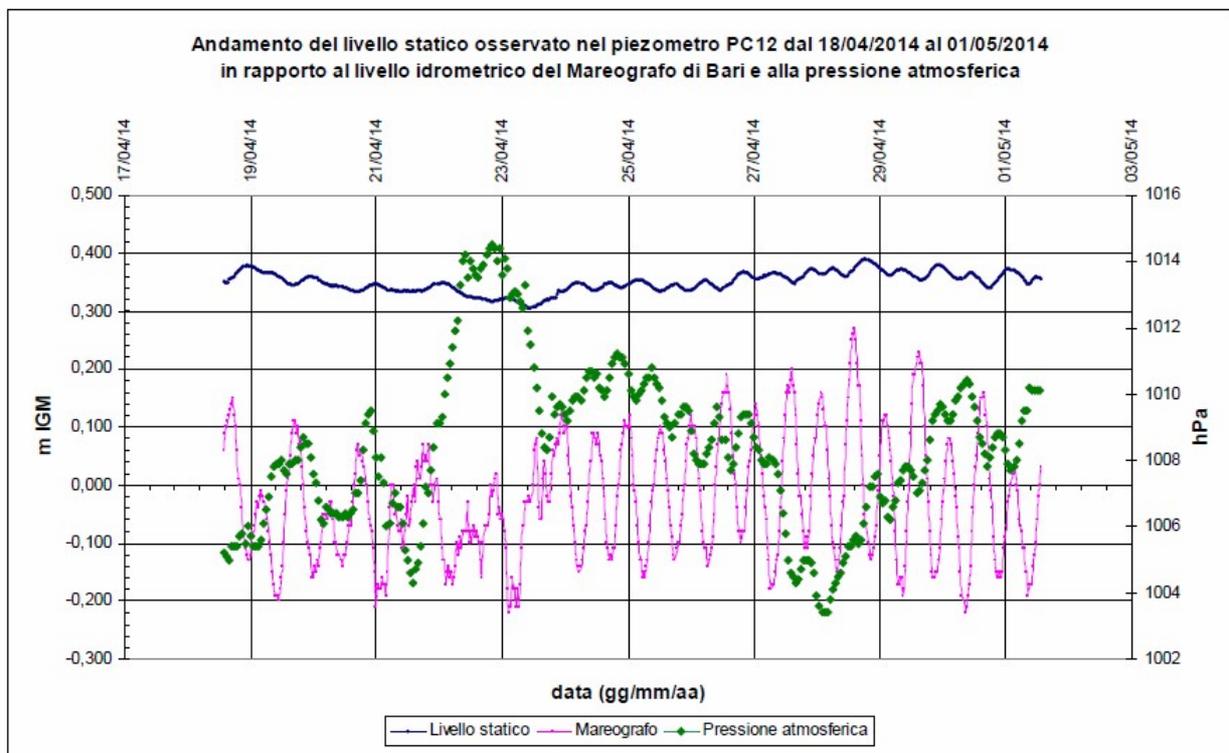


Figura 4.24 - Letture idrometrografiche nel piezometro PC12 e confronto con l'andamento delle maree e della pressione atmosferica

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 74 DI 96 |

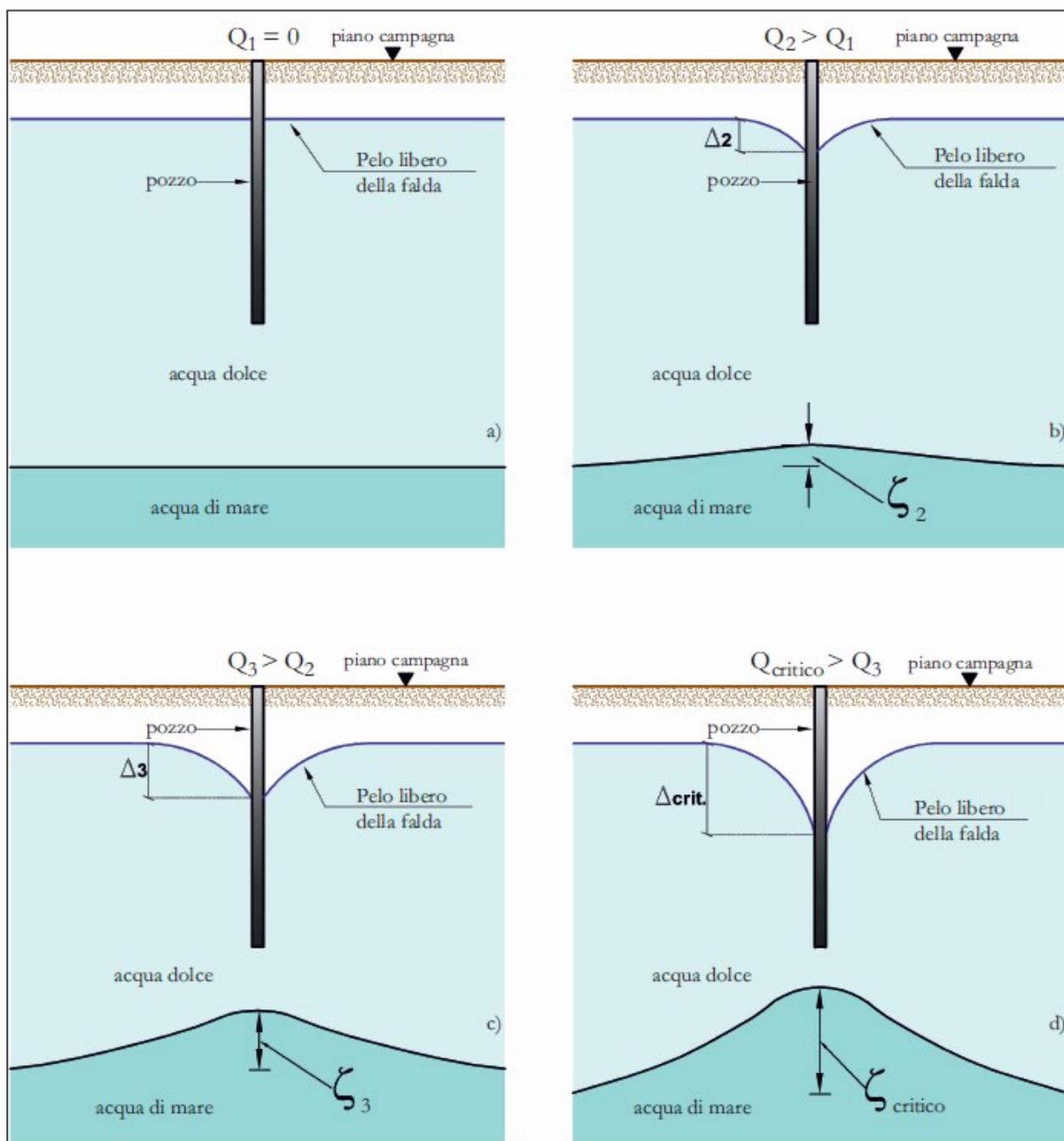


Figura 5.1 - Formazione del cono di intrusione marina in pozzi in emungimento nella ipotesi di interfaccia netta di separazione tra acqua dolce e acqua di mare.

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 75 DI 96 |

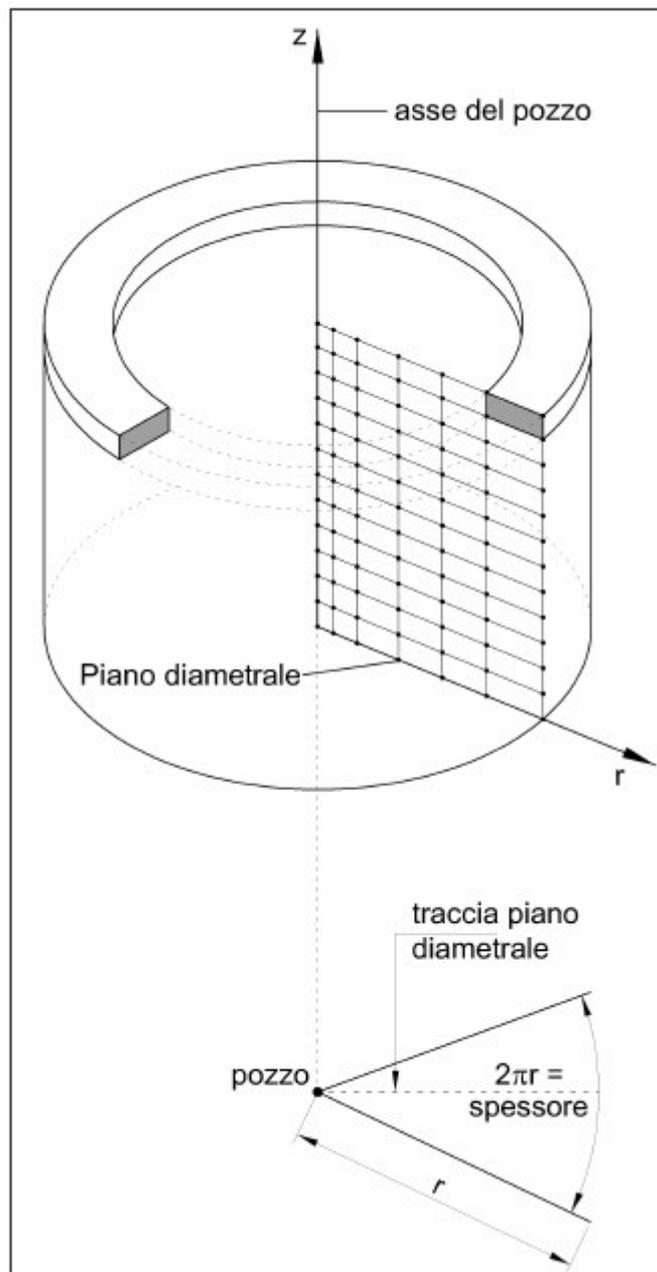


Figura 5.2: Sistema di riferimento per lo studio del salt-water upconing

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 76 DI 96 |

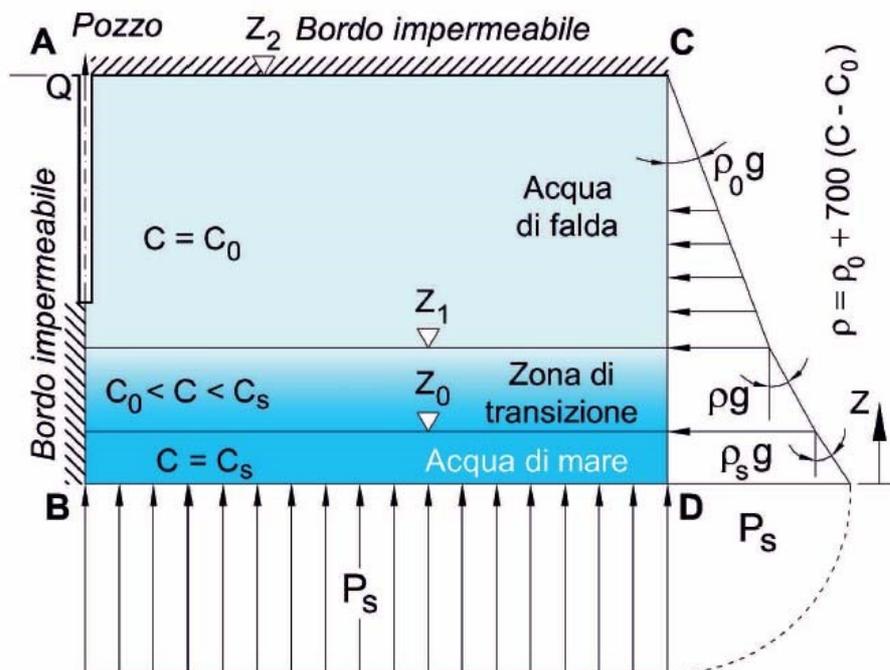


Figura 5.3: Condizioni iniziali e al contorno adottate per l'analisi del *salt water upconing* con il codice di calcolo numerico Sutra 2D3D.1.

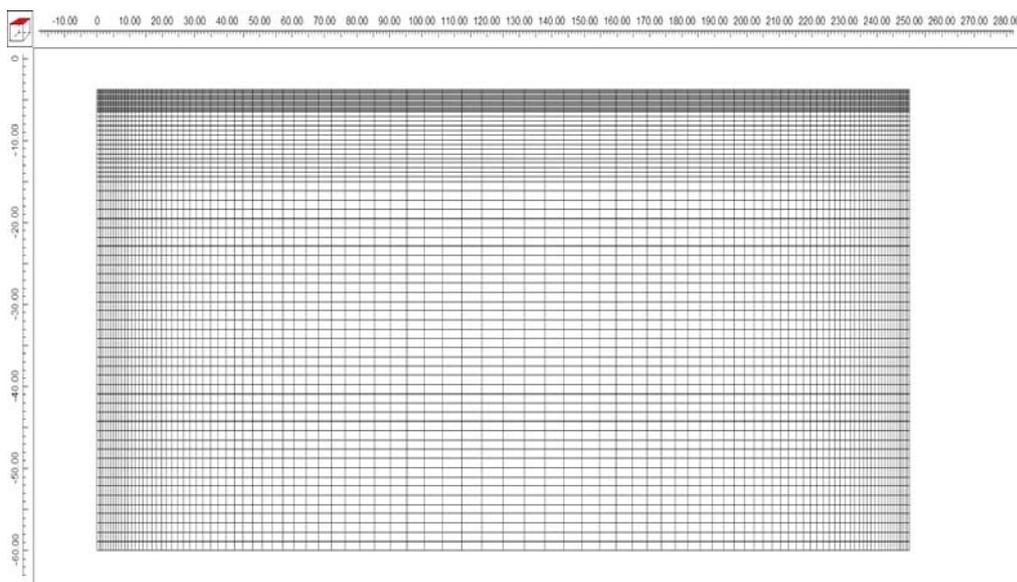


Figura 5.4: Modello Geometrico e discretizzazione adottata simulazioni numeriche eseguite con il

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 77 DI 96 |

metodo degli elementi finiti

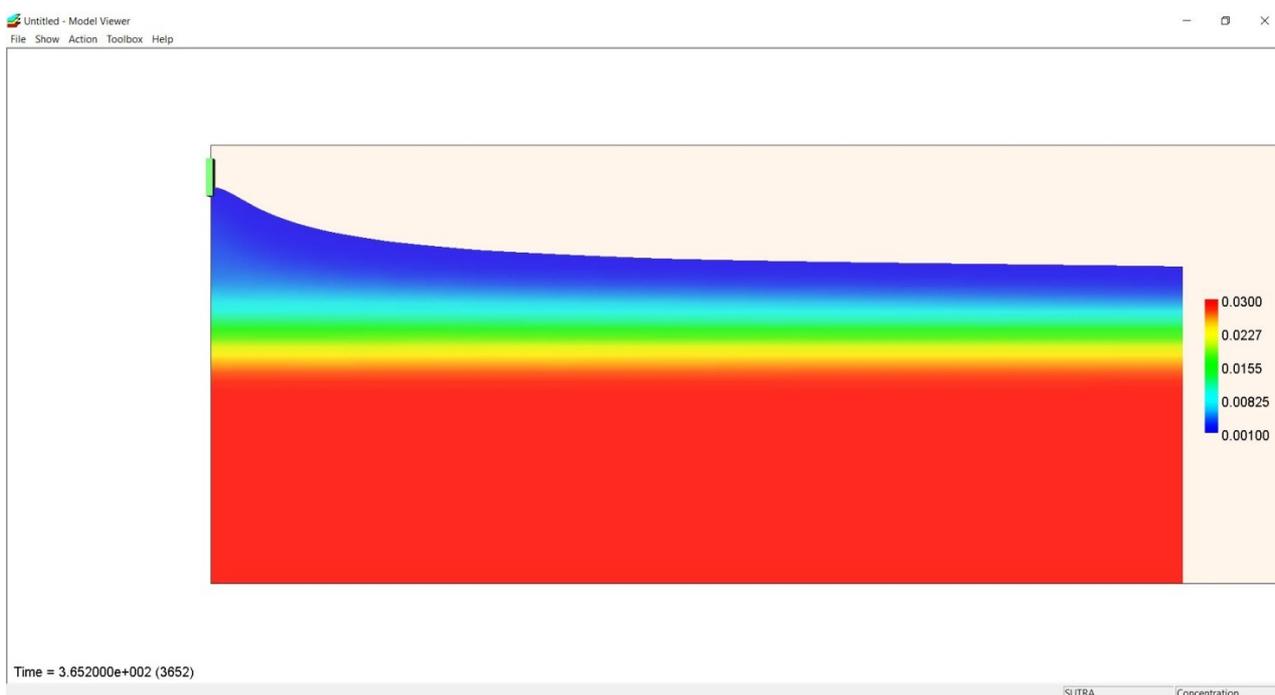
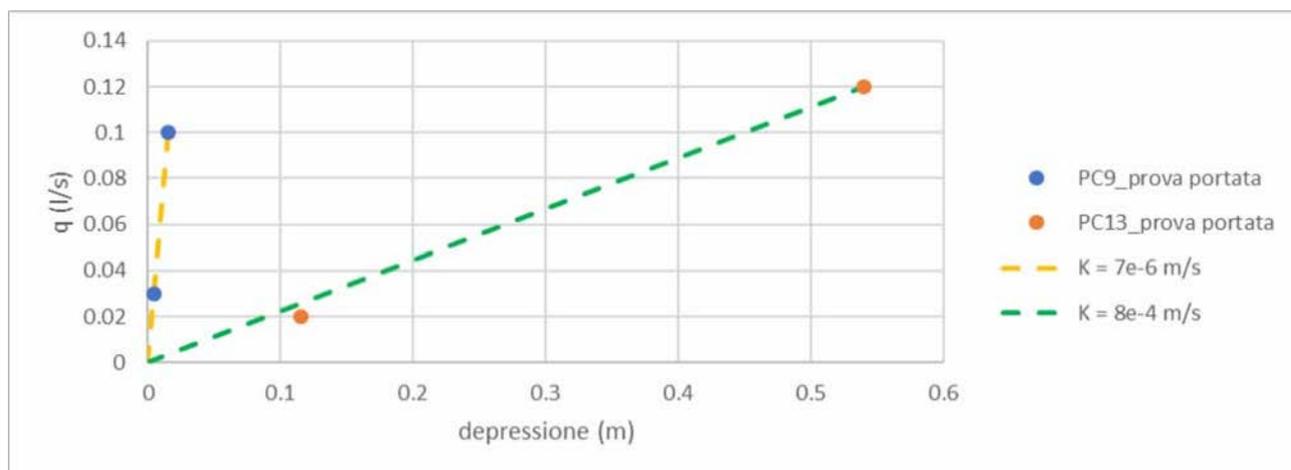


Figura 5.5: Distribuzione della concentrazione salina in condizioni stazionarie ottenute dopo un anno di emungimento caso di coefficiente di permeabilità pari a quello medio ($k=3 \times 10^{-4}$ m/s) e portata pari a quella media dell'impianto ($q=0,23$ l/s)



| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|--------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|--------------|---|----------|
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | | | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | <table border="1"> <thead> <tr> <th>PROGETTO</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IA3S</td> <td>01</td> <td>E ZZ RH</td> <td>IM.00.0.0001</td> <td>A</td> <td>78 DI 96</td> </tr> </tbody> </table> | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 78 DI 96 |
| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 78 DI 96 | | | | | | | | |

Figura 5.6: Curve di portata misurate in sito per i piezometri PC9 e PC13, e quelle ottenute con il calcolo agli elementi finiti eseguito con il codice di calcolo SUTRA in condizioni assialsimmetriche.

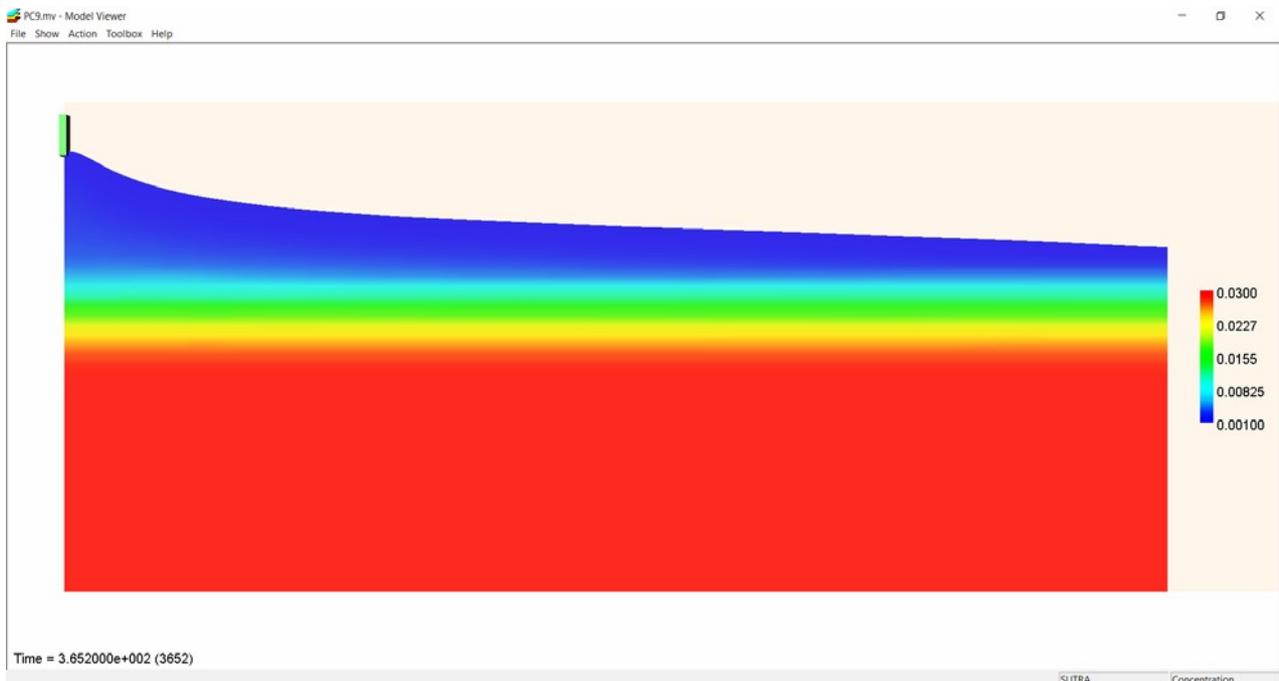


Figura 5.7: Distribuzione delle concentrazioni ad 1 anno, come desunte dal codice di calcolo (C in kg/kg), per il piezometro PC9.

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 79 DI 96 |

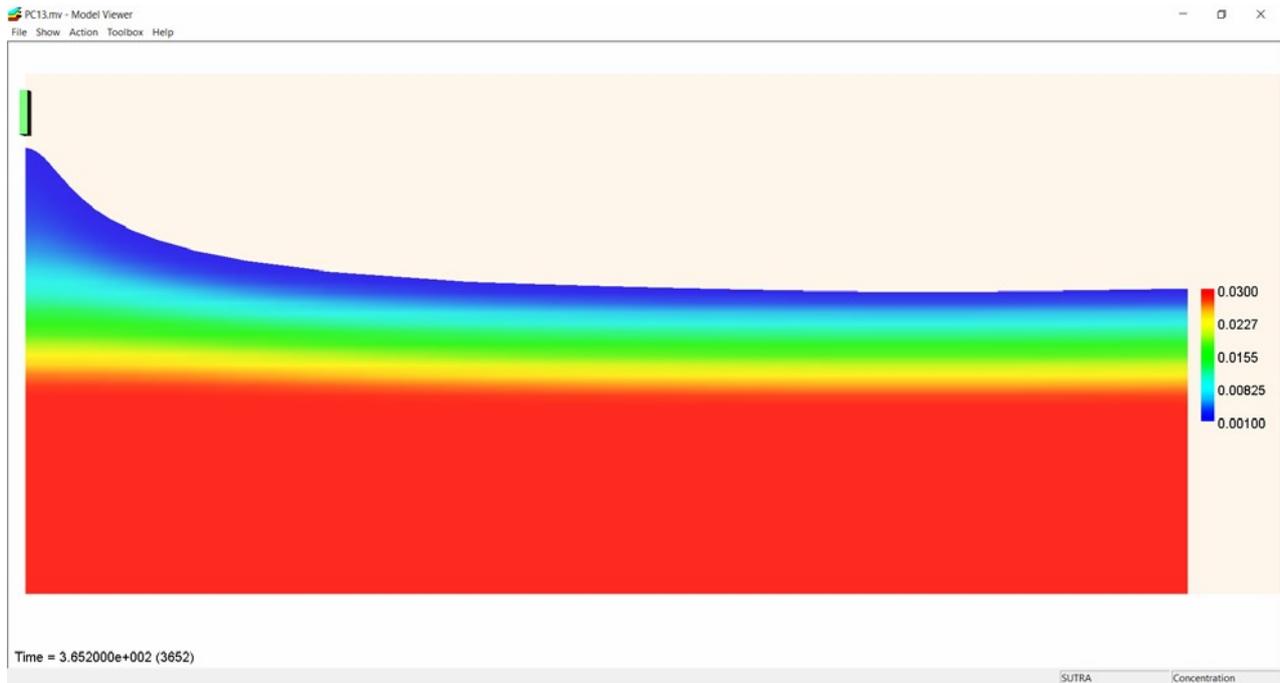
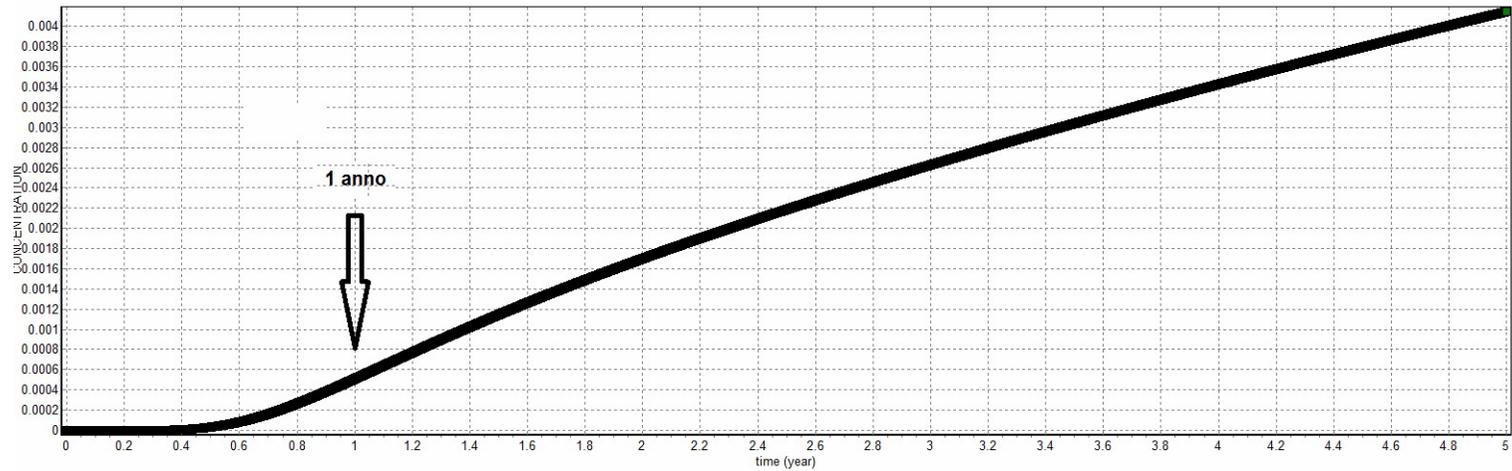


Figura 5.8: Distribuzione delle concentrazioni ad 1 anno, come desunte dal codice di calcolo (C in kg/kg), per il piezometro PC13.

| | | | | | | |
|--|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandatario: <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 80 DI 96 |



EXPLANATION
 obs

| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------|--------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|--------------|---|----------|
| PROGETTISTA: Mandataria: <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | | | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | <table border="1"> <thead> <tr> <th>PROGETTO</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IA3S</td> <td>01</td> <td>E ZZ RH</td> <td>IM.00.0.0001</td> <td>A</td> <td>81 DI 96</td> </tr> </tbody> </table> | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 81 DI 96 |
| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 81 DI 96 | | | | | | | | |

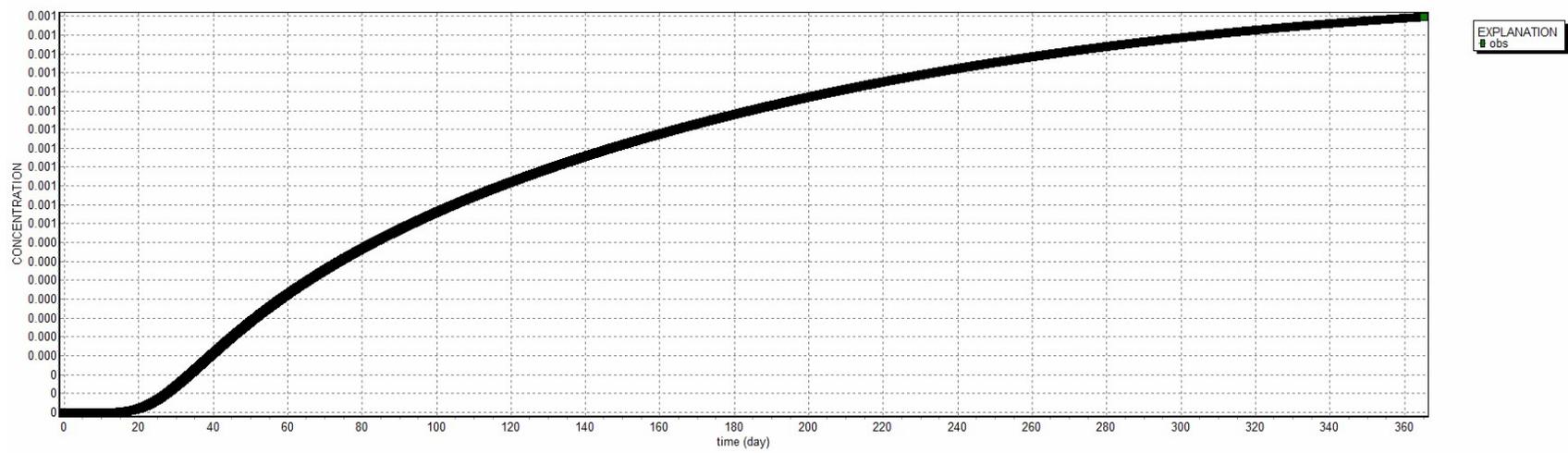


Figura 5.9: Andamento nel tempo della salinità alla base dei piezometri PC9 (sotto, durata simulazione 1 anno, portata 0,4 l/s) e PC13 (sotto, durata simulazione 5 anni, portata 0,05 l/s)

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 82 DI 96 |

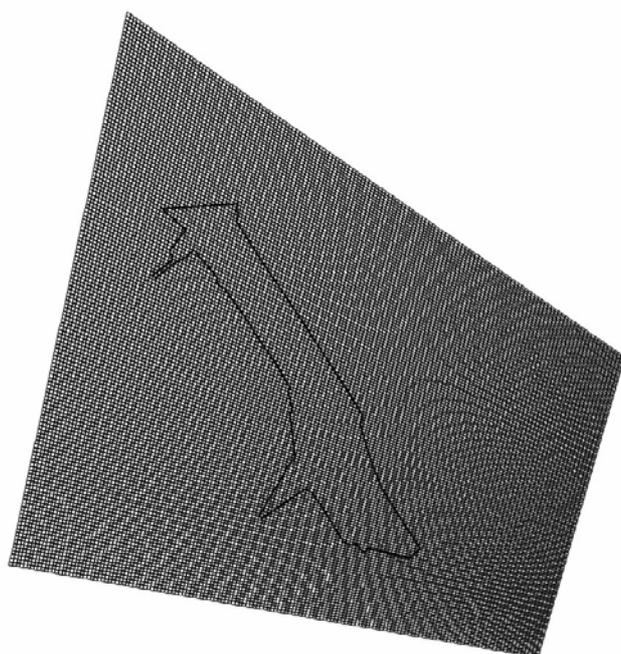


Figura 5.10. Modello geometrico adottato nelle analisi piane e relativa discretizzazione.

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 83 DI 96 |

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 84 DI 96 |



| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 85 DI 96 |

Figura 5.11: Distribuzione del coefficiente di permeabilità dell'acquifero profondo ottenuto interpretando le prove di emungimento adottando il metodo degli elementi finiti in condizioni piane orizzontali.

| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------|--------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|--------------|---|----------|
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | | | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | <table border="1"> <thead> <tr> <th>PROGETTO</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IA3S</td> <td>01</td> <td>E ZZ RH</td> <td>IM.00.0.0001</td> <td>A</td> <td>86 DI 96</td> </tr> </tbody> </table> | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 86 DI 96 |
| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 86 DI 96 | | | | | | | | |



| | | | | | | |
|--|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 87 DI 96 |

Figura 5.12 - Linee isopieziche ottenute con il metodo degli elementi finiti nello stato di fatto - ipotesi mezzo eterogeneo

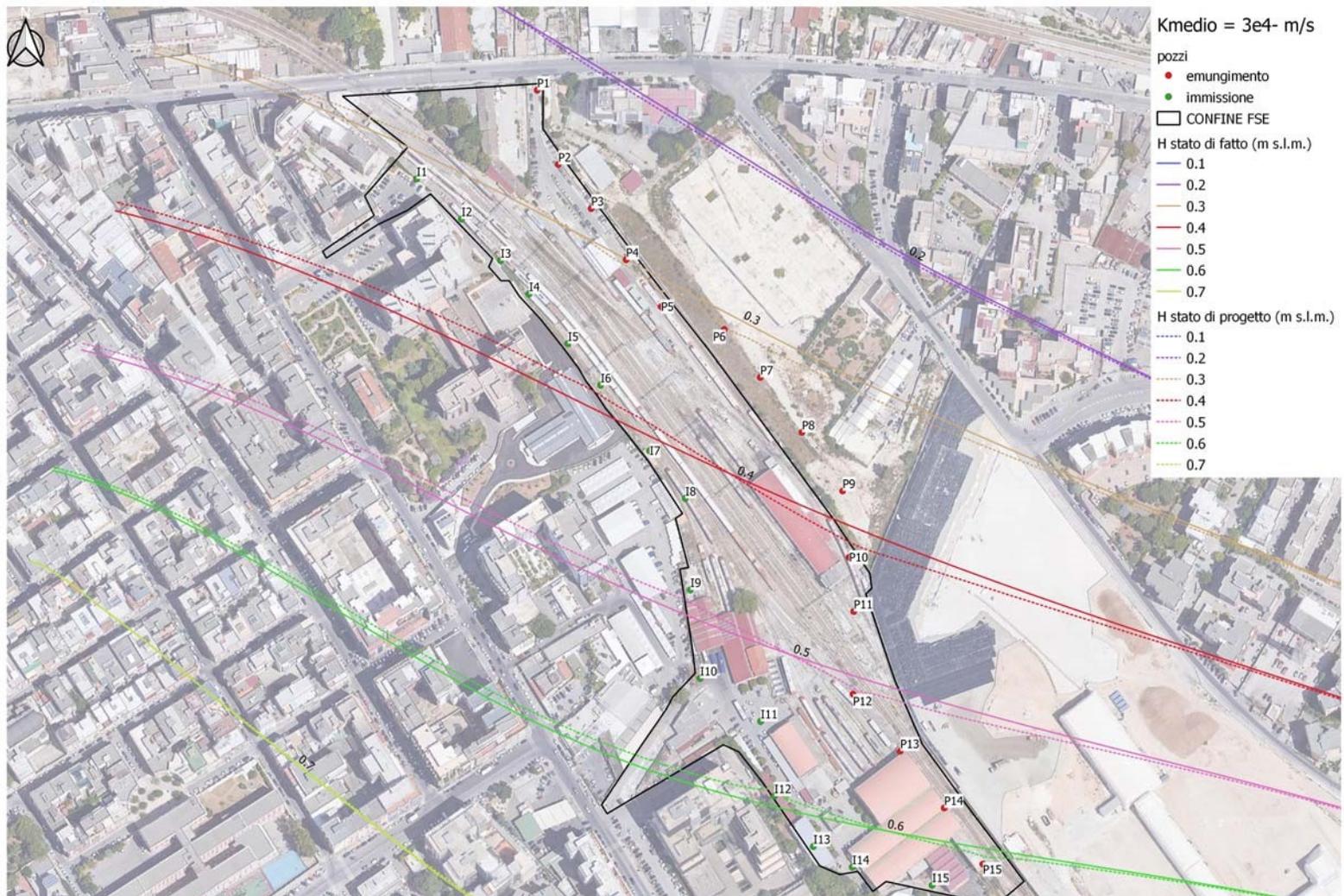
| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 88 DI 96 |



| | | | | | | |
|--|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 89 DI 96 |

Figura 5.13: Confronto tra le linee piezometriche nello stato di fatto (linea continua) e nello stato di progetto (linea punteggiata) - ipotesi mezzo eterogeneo

| | | | | | | |
|---|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 90 DI 96 |



| | | | | | | |
|--|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 91 DI 96 |

Figura 5.14: Confronto tra le linee piezometriche nello stato di fatto (linea continua) e nello stato di progetto (linea punteggiata) - ipotesi mezzo omogeneo

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 92 DI 96 |

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 93 DI 96 |

TABELLE

| | | | | | | |
|--|-------------------------------|-------|----------|--------------|------|----------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: Mandataria: Mandante: RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IA3S | 01 | E ZZ RH | IM.00.0.0001 | A | 94 DI 96 |

| | <i>Prove di assorbimento</i> | | <i>Prove in emungimento</i> | | <i>K (cm/s)</i> |
|------|--|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| | <i>Metodo di Lefranc-Mandel (cm/s)</i> | <i>Norme AGI (cm/s)</i> | <i>De Glee (1930) (cm/s)</i> | <i>Dupuit (1863) (cm/s)</i> | |
| PC1 | - | - | 4,62E-02 | 3,15E-02 | 3,89E-02 |
| PC2 | - | - | - | - | - |
| PC3 | - | - | - | 9,90E-02 | 9,90E-02 |
| PC4 | - | - | 4,62E-01 | 9,62E-02 | 2,79E-01 |
| PC5 | - | - | 7,23E-02 | 2,21E-02 | 4,72E-02 |
| PC6 | 2,45E-02 | 3,31E-01 | 1,53E-02 | 8,06E-03 | 9,46E-02 |
| PC7 | - | - | 8,61E-03 | 4,90E-03 | 6,75E-03 |
| PC8 | - | - | 9,65E-03 | 8,49E-03 | 9,07E-03 |
| PC9 | 2,04E-01 | 3,37E+00 | 7,39E-02 | 2,68E-02 | 9,17E-01 |
| PC10 | 1,71E-01 | 2,85E+00 | - | 3,33E-02 | 1,02E+00 |
| PC11 | 2,09E-02 | 4,43E-01 | 4,05E-02 | 2,15E-02 | 1,32E-01 |
| PC12 | - | - | 1,98E-02 | 1,02E-02 | 1,50E-02 |
| PC13 | - | - | 2,43E-03 | 1,60E-03 | 2,02E-03 |
| PC14 | - | - | 6,75E-02 | 2,30E-02 | 4,52E-02 |
| PC15 | 9,31E-03 | 2,98E-01 | 1,43E-02 | 5,95E-03 | 8,19E-02 |
| PC16 | - | - | 1,37E-02 | 8,56E-03 | 1,11E-02 |
| SC1 | - | - | - | 8,99E-03 | 8,99E-03 |
| SC2 | - | - | 6,14E-02 | 3,10E-02 | 4,62E-02 |
| SC3 | - | - | 4,27E-02 | 2,61E-02 | 3,44E-02 |
| SC4 | - | - | - | 4,85E-03 | 4,85E-03 |
| PZ1 | - | - | 6,86E-02 | 3,89E-02 | 5,38E-02 |
| PZ2 | - | - | 1,80E-02 | 1,25E-02 | 1,52E-02 |
| PZ4 | - | - | 1,29E-02 | 9,12E-03 | 1,10E-02 |
| PZ5 | - | - | 1,82E-03 | 1,26E-03 | 1,54E-03 |

Tabella 4.1 – Riepilogo risultati ottenuti dalle prove di portata in termini di coefficiente di permeabilità calcolato con formule analitiche chiuse

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|
| APPALTATORE: D'AGOSTINO ANGELO ANTONIO COSTRUZIONI GENERALI s.r.l. | RIASSETTO NODO DI BARI | | | | | |
| PROGETTISTA: <u>Mandatario:</u> <u>Mandante:</u> RPA srl Technital SpA HUB Engineering Scarl | TRATTA A SUD DI BARI – VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI CENTRALE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| PROGETTO ESECUTIVO: IM – Variante Ambientale Relazione idrogeologica e di calcolo sulle condizioni idrauliche sotterranee | PROGETTO IA3S | LOTTO 01 | CODIFICA E ZZ RH | DOCUMENTO IM.00.0.0001 | REV. A | FOGLIO 95 DI 96 |