Partner del Progetto:

Gestione sostenibile delle acque nella bassa Val di Cornia attraverso la riduzione della domanda idrica, la ricarica della falda e la riqualificazione fluviale

(LIFE14 ENV/IT/001290)

Progetto Definitivo per Impianto Pilota Dimostrativo di Ricarica della falda in condizioni controllate in località Forni (Suvereto) ai sensi del DM 100/2016

Azione	A5
Versione	v. 4.0
Data Versione	27/07/2017
Autori	Claudio Benucci, Marco Ruggiero, Emanuele Manetti; Roberta Maggiorelli (ASA spa), Riccardo Leoni, Federico Lazzaroni, Fernando Manzella (Regione Toscana), Alessandro Fabbrizzi (Consorzio Bonifica Toscana Costa), Rudy Rossetto, Giovanna de Filippis, Tiziana Sabbatini, Margherita De Peppo, Sandro Rinaldi, Valentina Ciccolini, Laura Ercoli, Edoardo Matani, Simone Maria Piacentini (Scuola Superiore Sant'Anna)
Stato	Versione definitiva

Cofinanziatori del Progetto

INDICE

INTRODUZIONE 7
PARTE A 13
Informazioni generali sul corpo idrico sotterraneo ricevente (a scala del corpo idrico) ... 13
1. Andamento dei livelli piezometrici 13
1.1 Piezometri della rete SIR-TOSCANA 15
2. Andamento delle portate delle sorgenti idrogeologicamente connesse al corpo idrico sotterraneo 17
3. Capacità d'immagazzinamento 18
4. Andamento temporale dei parametri chimici significativi 19
4.1 Andamento dei parametri chimici significativi per l'acquifero della Val di Cornia 19
4.2 Andamento dei parametri chimici significativi per il Fiume Cornia 20
5. Informazioni sui fenomeni di subsidenza registrati nella Val di Cornia e interazioni con il sistema di ricarica controllata di Suvereto 22
PARTE B 24
Informazioni sul corpo idrico sotterraneo a scala di sito 24
6. Informazioni sulla pedologia dell'area 24
7. Caratteristiche idrogeologiche del sito, conducibilità idraulica orizzontale della falda e verticale dell'insaturo 26
8. Andamento del campo di moto delle acque sotterranee 31
9. Interazioni tra acque sotterranee ed acque superficiali 39
10. Misure correntometriche 42
11. Andamento temporale dei parametri chimici significativi: risultati dal monitoraggio *ante-operam* 45
12. Modellazione degli effetti della ricarica 59
PARTE C: 64
Informazioni generali sul corpo idrico donatore superficiale 64
13. Modellazione della derivazione dal Fiume Cornia 64
14. DESCRIZIONE TECNICA DELLE OPERE DA REALIZZARE 66
14.1 Opera di presa 66
14.2 Impianto di sollevamento 66
14.3 Bacino di sedimentazione e infiltrazione 67
14.4 Opere elettriche 67
14.5 Rispondenza al PIT 68
14.6 Opere di inserimento paesaggistico 68
15. ANALISI ECONOMICA DELL'INTERVENTO 70
15.1 Opzione zero e scelte alternative 70
16. ANALISI DI RISCHIO 72
16.1 Introduzione 72

16.2 Albero dei guasti 73
16.3 MAR-RISKAPP 76
16.4 Analisi di rischio del sistema di ricarica controllata nella bassa Val di Cornia 77
16.4.1 Limiti non tecnici 77
16.4.2 Limiti tecnici 80
16.5 Risultati 82
17. PIANO DI GESTIONE E MANUTENZIONE 84
18. PIANO DI MONITORAGGIO E CONTROLLO 85
18.1 Sistema di monitoraggio *post-operam* 86
18.2 Sistema di monitoraggio prima allerta 89
19. PIANO DI EMERGENZA 91
Bibliografia 92

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 0.1. Il Corpo Idrico Significativo Sotterraneo della Pianura del Cornia (da Regione Toscana 2009); il rettangolo in rosso indica l'area in cui è previsto l'intervento di ricarica. 8
Fig. 0.2. Carta della distribuzione dei differenti tipi chimici nel CISS in oggetto (da Regione Toscana 2009) 9
Fig. 0.3. Area interessata dall'intervento di ricarica (rettangolo rosso); Google Earth TM. 10
Fig. 0.4. Localizzazione dell'impianto di ricarica delle falde in condizioni controllate nell'area di Forni (Comune di Suvereto). 11
Fig. 1.1. Andamento delle isopieze nell'Aprile 2011 (da Regione Toscana 2012). 14
Fig. 1.2. Caratterizzazione geologica sulla base del Continuum geologico Regionale (CNR – IGG e Consorzio LaMMA, 2009b; modificato) e digitalizzazione della Carta Idrogeologica della Pianura di Piombino (Ghezzi et al., 1995). Le frecce rosse indicano gli ingressi di acqua marina nell'acquifero. 14
Fig. 1.3. Posizione dei piezometri della rete SIR-TOSCANA. 15
Fig. 1.4. Andamento dei piezometri dell'area centrale (m sul medio mare). 16
Fig. 1.5. Andamento dei piezometri dell'area costiera meridionale. 16
Fig. 2.1. Mappa delle sorgenti censite dal SIR-TOSCANA nell'area della Val di Cornia. 17
Fig, 4.1. Stazioni di monitoraggio delle acque sotterranee ARPAT (http://sira.arpat.toscana.it/sira/inspire/view.php?dataset=mat_stato). Legenda del colore delle stazioni: blu) stato chimico buono; verde) stato chimico buono, con alcuni parametri superiori alle normative per cause naturali; giallo) stato chimico generalmente buono, scarso per singoli parametri; rosso) stato chimico scarso. 19
Fig. 4.2. Stazione MAS-078 dell'ARPAT (in verde), e zona del sito di ricarica (in rosso). Modificato da SIRA ARPAT (http://sira.arpat.toscana.it/sira/inspire/view.php?dataset=mas_schim_fiumi) ... 21
Fig. 4.3. Determinazioni dell'ARPAT del mercurio nella stazione MAS-078. 21
Fig. 6.1. Particolare delle alluvioni recenti del Fiume Cornia. 25
Fig. 7.1. Carta idrogeologica e sezioni G'G e P'P', con in rosso l'area del sito di ricarica. Modificata da Barazzuoli et al., 1999. 26
Fig. 7.2. Sezione PP' della Pianura del Fiume Cornia con descrizione qualitativa delle permeabilità delle diverse formazioni (Barazzuoli et al., 1999). 26
Fig. 7.3.a Carta delle profondità dei sedimenti ghiaiosi, con resistività superiore a 100 Ohm * m, in prossimità dell'area di ricarica (modificata da CGT, 2011). 27
Fig. 7.4. Posizione delle prove infiltrometriche, eseguite nell'area del sito (linea continua: perimetro della vasca d'infiltrazione). 29
Fig. 7.5. Grafico dell'infiltrazione accumulata nel tempo relativa alla prova infiltrometrica "inf04". Il coefficiente angolare del segmento in verde rappresenta il tasso di infiltrazione 30
Fig. 8.1. Rete di piezometri e paletti idrometrici utilizzata per il monitoraggio *ante-operam* nell'area di interesse. 33
Fig. 8.2. Dettaglio della rete di piezometri e paletti idrometrici usata nel monitoraggio nei pressi dell'area d'interesse. 34
Fig. 8.3. Ricostruzione della piezometria, Novembre 2016 35
Fig. 8.4. Ricostruzione della piezometria, Marzo 2017. 36
Fig. 8.5. Ricostruzione della piezometria, Giugno 2017. 37
Fig. 8.6. Misure piezometriche nell'area di interesse rilevate durante il monitoraggio *ante-operam*. 38
Fig. 9.1. Posizione delle sezioni rilevate con gps del Fiume Cornia. L'area del sito è compresa fra le sezioni 02 e 03. 39
Fig. 9.2. Ubicazione dei caposaldi sul Fiume Cornia rilevati con GPS. L'area di sito è compresa tra i caposaldi PA_01 e 02 e PA_03 e 04. 40
Fig. 9.3. Sezione 01B, a monte dell'area di ricarica. Subito a monte della sezione è presente una traversa sul fiume, per il passaggio di veicoli. La quota minima del letto fluviale è 29.5 m s.l.m., la media è 29.84. 40
Fig. 9.4. Sezione 02, immediatamente a monte della vasca d'infiltrazione. La quota minima del letto fluviale è 28.04 m s.l.m., la media è 28.20. 40
Fig. 9.5. Sezione 03, a valle della vasca d'infiltrazione. La quota minima del letto fluviale è 25.67 m s.l.m., la media è 25.77. 41

Fig. 10.1. Località dove il servizio idrologico della Regione Toscana ha svolto le misure correntometriche. 43
Fig. 10.2. Tratto in secca in data 19/06/2017, a valle dell'impianto di ricarica, caposaldo PA_04.. 44
Fig. 10.3. Tratto in secca nel periodo 19/06/2017, località Guado di Forni, caposaldo PA_11. 44
Fig. 10.4 Livelli piezometrici misurati nelle stazioni nell'area di sito (REW) e idrometrici (PA) misurati ai capisaldi dell'alveo. 44
Fig. 11.1 Punti di monitoraggio utilizzati. 45
Fig. 11.2. Diagramma Piper delle analisi del monitoraggio. 47
Fig. 11.3. Diagramma Schoeller delle analisi del monitoraggio. 48
Fig. 11.4. Valori delle concentrazioni monitorate per gli analiti magnesio, sodio e calcio. 50
Fig. 11.5. Valori delle concentrazioni monitorate per l'ossigeno disciolto. 51
Fig. 11.6. Valori delle concentrazioni monitorate per i solfati 51
Fig. 11.7. Valori delle concentrazioni monitorate per i cloruri. 52
Fig. 11.8. Valori delle concentrazioni monitorate per i fluoruri. 52
Fig. 11.9. Valori delle concentrazioni monitorate per il boro. 53
Fig. 11.10. Valori delle concentrazioni monitorate per l'arsenico. Durante le prove svolte durante gennaio e febbraio 2017 non è stato necessario utilizzare il bailer per lo spurgo dei piezometri REW 5 e 6, a causa della rottura della pompa. I risultati non devono quindi essere considerati rappresentativi dell'acqua in circolazione attiva nell'acquifero, ma di quella presente nel foro. 53
Fig. 11.11. Valori delle concentrazioni monitorate per gli analiti ferro e bromo. Si osservano il picco di concentrazione del ferro nel REW6 durante gennaio e febbraio 2017, quando non è stato possibile usare la pompa per spurgare il piezometro. 54
Fig. 11.12. Valori delle concentrazioni monitorate per lo stronzio. 54
Fig. 11.13. Valori delle concentrazioni monitorate per l'alluminio. 55
Fig. 11.14. Valori delle concentrazioni monitorate per il manganese. 55
Fig. 11.15. Valori delle concentrazioni monitorate per il nitrato. 56
Fig. 11.16. Valori delle unità formanti colonie monitorate per *E. coli.* 56
Fig. 11.17. Valori delle unità formanti colonie monitorate per Batteri coliformi. 57
Fig. 11.18. Valori delle unità formanti colonie monitorate per *C. perfringens*. 57
Fig. 11.19. Valori delle unità formanti colonie monitorate per *P. aeruginosa.* 58
Fig. 12.1. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 25/01/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 20 l/s. 59
Fig. 12.2. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 25/01/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 50 l/s. 60
Fig. 12.3. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 11/05/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 20 l/s. 61
Fig. 12.4. *Aumento dell'altezza idraulica simulata al 11/05/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 50 l/s.* 62
Fig. 12.5. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 11/05/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 20 l/s – zoom sull'intero dominio di studio. 62
Fig. 12.6. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 11/05/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 50 l/s – zoom sull'intero dominio di studio. 63
Fig. 13.1. Curva di deflusso sperimentale determinata presso il Guado dei Forni. 64
Fig. 16.1. Rappresentazione schematica di un albero di guasti per il rischio di contaminazione idrogeologica per una serie di *n* contaminanti. 75
Fig. 18.1. Punti di monitoraggio piezometrico previsti per il sistema di monitoraggio *post-operam*. 88
Fig. 18.2. Configurazione dello schema di prima allerta. 90

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 4.1. Determinazioni ARPAT dei parametri che, nei territori dei comuni di Campiglia Marittima e Suvereto, durante il triennio 2014 – 2016 hanno avuto concentrazioni annuali medie superiori ai valori soglia. ARPAT definisce queste concentrazioni causate da fondi naturali. *Per la stazione COLTIE 4 non è disponibile il 2014, sono riportati i valori del 2013. 20
Tab. 7.1. Risultati prove infiltrometriche. 30
Tab. 8.1. Date dei monitoraggi piezometrici svolti, numero di punti monitorati per le acque sotterranee e numero di misure stimate (s) o misurate (m) per le acque superficiali. 31
Tab. 10.1. Portate (Q) determinate dal servizio idrologico della Regione Toscana per sezioni del Fiume Cornia. 43
Tab. 10.2. Determinazioni delle misure correntometriche del Fiume Cornia svolte in prossimità dei caposaldi PA_11 e PA_04 (*valori stimati in via speditiva). 43
Tab. 11.1. Confronto fra limite di rilevabilità della metodica usata, e eventuali limiti normativi ai sensi del D.Lgs 30/2009 per mercurio, ione ammonio, fosfato e litio. 48
Tab. 16.1. Questionario sui rischi percepiti non tecnici. 79
Tab. 16.2. Questionario sui rischi tecnici percepiti. 82
Tab. 16.3. Tabella comprensiva fra la percezione del rischio ed i valori calcolati. 83

INTRODUZIONE

Nel contesto del progetto LIFE REWAT, in località Forni (nel territorio comunale di Suvereto) è prevista la messa in opera di un impianto prototipale di ricarica della falda in condizioni controllate (*Managed Aquifer Recharge* - MAR) sfruttando la morfologia locale e derivando i flussi di morbida o comunque in eccesso rispetto al minimo deflusso vitale, ovvero senza produrre alterazioni significative al regime idrologico nelle sezioni interessate del Cornia. L'intervento riguarda la porzione apicale del Corpo Idrico Sotterraneo Significativo (CISS) 32CT020 "Acquifero della Pianura del Cornia".

Il progetto REWAT (*sustainableWATer management in the lower Cornia valley through demand REduction, aquifer Recharge and river Restoration*) nasce con l'obiettivo di sviluppare una strategia partecipata per la gestione sostenibile delle risorse idriche per lo sviluppo socio-economico ed il mantenimento degli agroecosistemi della Val di Cornia attraverso la razionalizzazione dei consumi di acqua (civile e agricola) e azioni di conservazioni delle acque meteoriche, andando a mitigare gli stress attualmente in atto sulla risorsa.

Il raggiungimento dell'obiettivo generale è basato su quattro pilastri:

1) promuovere la conoscenza sul funzionamento del sistema idrologico integrando le conoscenze sul territorio, sulle acque superficiali e quelle di falda ed i diversi utilizzi dell'acqua;

2) promuovere il coinvolgimento attivo dei vari attori nella gestione della risorsa idrica;

3) realizzare cinque interventi (riqualificazione fluviale, ricarica della falda in condizioni controllate, riuso di reflui trattati per l'irrigazione, efficientamento dell'irrigazione, riduzione perdite dell'acquedotto) il cui obiettivo è dimostrare l'efficacia di una serie di possibili azioni innovative per migliorare la gestione della risorsa idrica;

4) sviluppare uno strumento di governance integrato e partecipato per la gestione sostenibile della risorsa idrica, che si concluderà con la stesura di un "contratto per l'acqua" (mutuato dal ben noto "contratto di fiume"): un'esperienza innovativa a livello italiano che consiste in un accordo che coinvolge tutti gli attori nel programmare la gestione della risorsa acqua in un determinato bacino.

Il Fiume Cornia costituisce uno dei tre sistemi idrografici principali del bacino regionale denominato Toscana Costa, situato nell'ambito costiero (versante tirrenico) del Distretto Idrografico dell'Appenino Settentrionale. Origina sulle colline Metallifere ad 875 m s.l.m.; lungo il suo percorso di circa 50 km, con un bacino di 345 km^2 (Rapporto di caratterizzazione ambientale Azione A3 LIFE REWAT), attraversa le province di Pisa, Grosseto e Livorno prima di sfociare nel mare Tirreno. Si divide in due rami: Fosso Cornia Vecchia, il quale attraversa la pianura alluvionale omonima da NE a SO con un andamento pressoché meandriforme fino all'altezza di Venturina, per poi proseguire con un alveo artificiale a forma di spezzata fino alla foce nel Mar Tirreno a Ponte d'Oro, e il Fiume Cornia, canalizzato, che sfocia a Tor del Sale (Piombino, nel Mar Tirreno). Dal

punto di vista geografico la pianura del Cornia coincide in buona parte con la Pianura di Piombino (Fig. 0.1) e costituisce un serbatoio naturale di acqua dolce, localizzato nell'acquifero multistrato CISS 32CT020. Tale CISS si estende a Sud di S. Vincenzo, fino alla città di Follonica, ed è limitato ad occidente dai rilievi di Piombino e dal mare, mentre ad est confina con i rilievi compresi fra Campiglia Marittima, Suvereto e Riotorto.

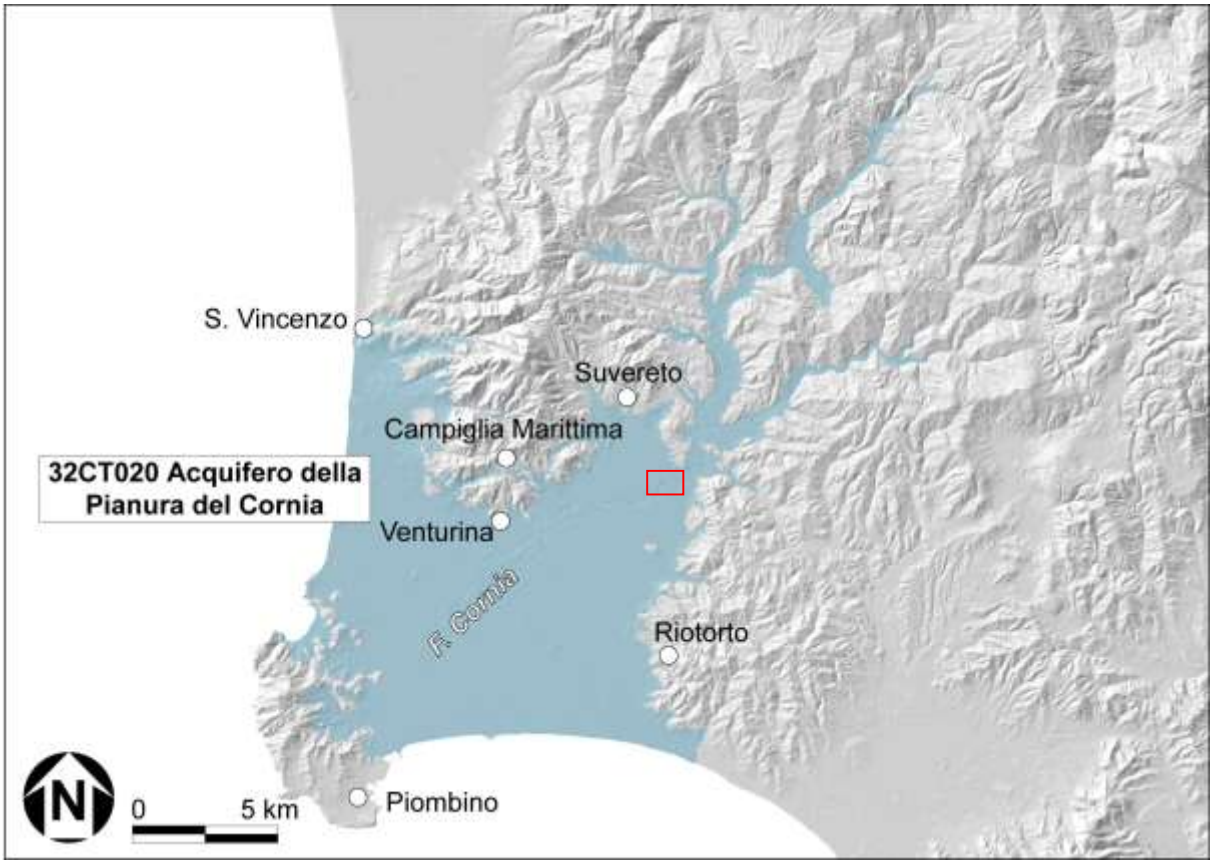


Fig. 0.1. Il Corpo Idrico Significativo Sotterraneo della Pianura del Cornia (da Regione Toscana 2009); il rettangolo in rosso indica l'area in cui è previsto l'intervento di ricarica.

Il rapporto "Caratterizzazione geologica, idrogeologica ed idrogeochimica dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi della Regione Toscana (CISS) 32CT020 Acquifero della Pianura del Cornia" (Consorzio LAMMA e CNR, 2009) riconosce cinque tipi idrochimici delle acque del sottosuolo della pianura del Fiume Cornia (Fig. 0.2). Oltre alle acque Ca-HCO3 e Mg(Ca)HCO3, di origine meteorica, e quelle appartenenti alle facies Ca-SO4, interagenti con depositi evaporitici, il rapporto identifica acque a facies Na-Cl, da Ca-Cl a Mg(Ca)Cl, e Na-HCO3 non solo in prossimità delle linee di costa, ma anche nella fascia centrale della piana del Cornia, nei pressi dell'abitato di Venturina. Questa distribuzione geografica suggerisce il verificarsi di intrusione di acque marine e salmastre, sia diretta (cuneo salino) che per risalita lungo gli alvei del Fiume Cornia

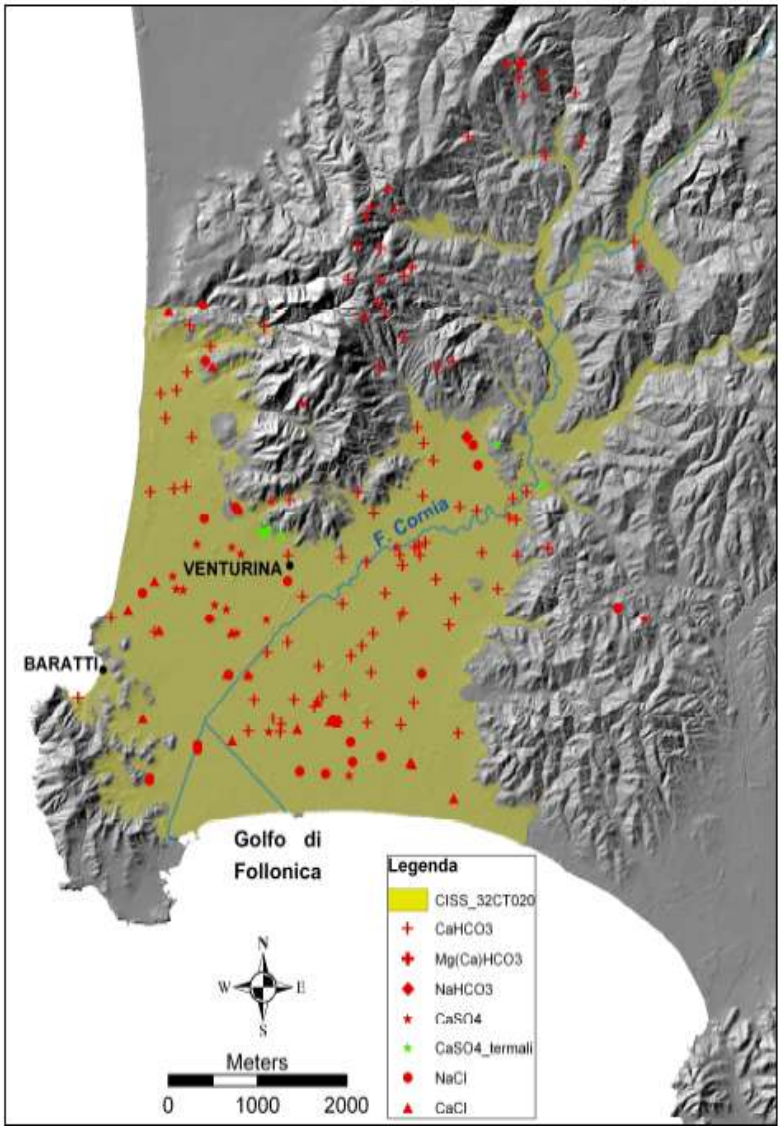


Fig. 0.2. Carta della distribuzione dei differenti tipi chimici nel CISS in oggetto (da Regione Toscana 2009)

Il sistema in analisi è da decenni caratterizzato da una condizione di forte disequilibrio quantitativo del bilancio idrogeologico, causato da un uso intensivo della risorsa idrica prevalentemente ad opera dei comparti irriguo, industriale e civile, quest'ultimo comprendendo anche l'Isola d'Elba, verso la quale sono convogliati 3-3,8 Mm^3 (sugli 6,0-6,7 Mm^3 totali del fabbisogno idrico dell'isola). Lo sfruttamento dell'acquifero ha indotto una serie di variazioni piezometriche con un progressivo abbassamento della falda ed un conseguente arretramento dello zero idrometrico verso l'interno. L'abbassamento più consistente, nell'ordine di 12 m, si è avuto nell'area più interna della bassa pianura del Cornia. Un calcolo volumetrico del deficit idrico totale accumulatosi nel trentennio dagli anni '70 al 2001 porta ad una stima di circa 8 Mm^3 la cui gran parte, circa il 50%, si è accumulata negli anni 1990-2001 (Regione Toscana 2003).

Tale alterazione ha comportato importanti conseguenze per la tutela qualitativa delle relative risorse idriche a causa dell'ingressione salina dai corpi idrici marino-costieri, con alterazione degli ecosistemi terrestri connessi (in particolare le aree umide retro-

costiere, tra cui il SIC/ZPS IT5160010 "Padule Orti Bottagone" e l'area umida protetta "della Sterpaia"). Il fenomeno è proseguito negli anni '90, con la completa salinizzazione di interi comparti idrogeologici, ed attualmente è caratterizzato da una pericolosa tendenza di avanzamento delle curve di bassa-media salinità verso i campi pozzi idropotabili.

Ulteriori esternalità negative derivano dalla depressurizzazione delle falde della bassa pianura, che ha determinato fenomeni di subsidenza con conseguenti danni registrati al patrimonio immobiliare e infrastrutturale.

Il presente documento costituisce il progetto definitivo per la messa in opera di un impianto di ricarica della falda in condizioni controllate (*Managed Aquifer Recharge* - MAR), posto in località Forni (Suvereto, Livorno; Fig. 0.3), uno dei 5 interventi dimostrativi del progetto REWAT. L'obiettivo principale di questo intervento è quello di permettere la diminuzione del deficit di bilancio idrico della Val di Cornia, aumentando l'immagazzinamento di acqua nel sottosuolo (*water banking*) ed evitando il consumo di territorio che si andrebbe ad avere qualora si volesse riequilibrare il bilancio diminuendo i prelievi attraverso, ad esempio, un invaso superficiale. Secondo obiettivo è anche quello della vivificazione degli ecosistemi terrestri.

Fig. 0.3. Area interessata dall'intervento di ricarica (rettangolo rosso); Google Earth TM.

La tecnica di ricarica della falda in condizioni controllate è innovativa per i paesi dell'Unione Europea, ed in particolar modo per l'Italia, tanto che negli ultimi anni la Commissione Europea ha finanziato una serie di progetti di ricerca nell'ambito del Settimo Programma Quadro sul tema, tra i quali il più importante è il progetto MARSOL, www.marsol.eu, ed ha approvato un gruppo di azione per la diffusione della tecnica nell'Unione nell'ambito del programma *European Innovation Partnership – Water*: "*MAR Solutions – Managed Aquifer Recharge Strategies and Actions*" (AG128).

L'impianto di ricarica di Suvereto è uno dei primi impianti di ricarica della falda "in condizione controllate" in Italia. La tecnica di ricarica prescelta è quella di un bacino di infiltrazione (*infiltration basin*) localizzata in un basso topografico preesistente (Fig. 0.4).

L'area è costituita da suoli a prevalente tessitura ghiaiosa-sabbiosa molto permeabili. L'area individuata è stata scelta in quanto le acque qui fluenti hanno bassi contenuti in boro e arsenico, elemento naturalmente elevato nell'area e che ha costretto ASA spa negli anni passati ad importanti investimenti per abbatterne le concentrazioni a scopo idropotabile. L'impianto prototipale è stato realizzato per derivare i flussi in eccesso rispetto al minimo deflusso vitale, senza produrre alterazioni significative al regime idrologico nelle sezioni interessate del Cornia.

La funzionalità dell'impianto è prevista nei mesi tra ottobre e fine maggio, compatibilmente con la disponibilità di acque fluenti, per un minimo quantitativo di acque derivate da Fiume Cornia per la ricarica quantificato in circa 360000 m^3, corrispondente ad una derivazione media di circa 20 l/s verso l'impianto di ricarica per 210 giorni. L'obiettivo ottimale è la derivazione di circa 600000 m^3 dal Fiume Cornia nel periodo sopraindicato, corrispondente ad una derivazione media di circa 35 l/s verso l'impianto di ricarica per 210 giorni. La massima derivazione attesa è valutabile in circa 900.000 m^3/anno, corrispondenti ad una derivazione media pari a 50 l/s.

Il volume effettivamente ricaricato potrà in parte essere drenato dal Fiume Cornia, garantendo comunque un deflusso in alveo. Poiché il drenaggio si verificherà con velocità (e quindi tempi) legati al moto di filtrazione dell'acqua in mezzi porosi, verificandosi nel periodo di minor deflusso questo potrà garantire una ulteriore aliquota di ricarica della falda di subalveo.

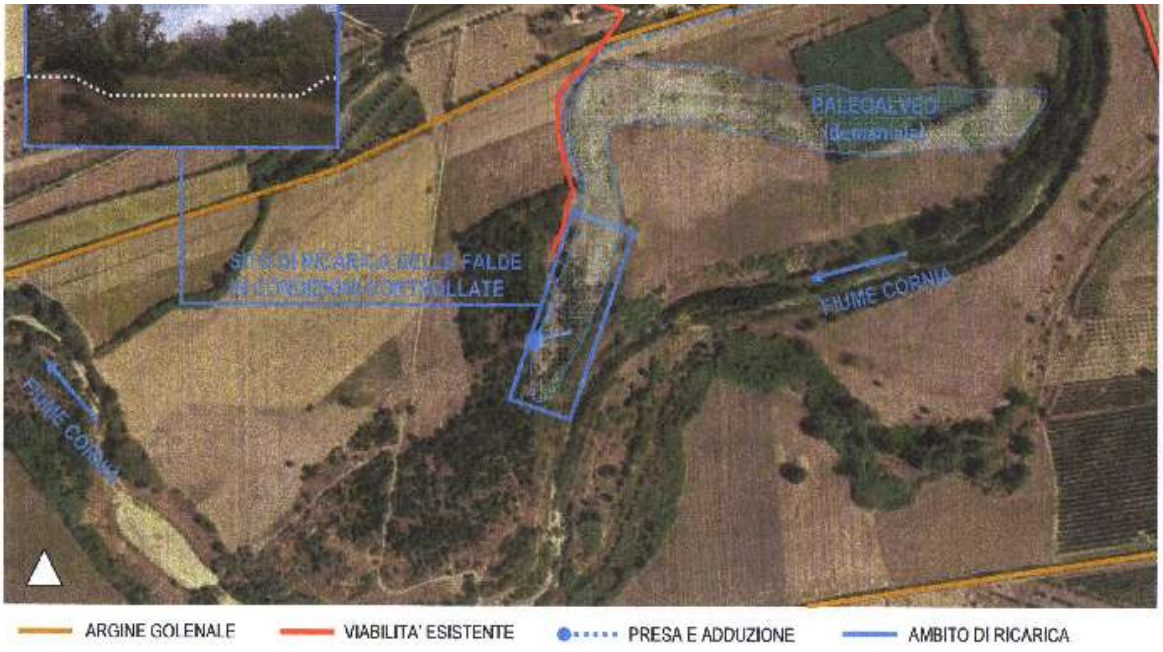


Fig. 0.4. Localizzazione dell'impianto di ricarica delle falde in condizioni controllate nell'area di Forni (Comune di Suvereto).

Il presente progetto definitivo è stato redatto seguendo le indicazioni riportate nel DM 2 maggio 2016 n.100: "***Regolamento recante criteri per il rilascio dell'autorizzazione al ravvenamento o all'accrescimento artificiale dei corpi idrici sotterranei…***". In tale regolamento al Punto B dell'Allegato 1 si fissano i "Criteri per il rilascio dell'autorizzazione alla ricarica controllata dei corpi idrici sotterranei".

Questi richiedono per il rilascio della necessaria autorizzazione la redazione di un progetto preliminare e di un progetto definitivo.

Il presente documento riporta tutte le informazioni richieste per il progetto definitivo.

Come richiesto dal DM 100/2016, le informazioni contenute nel Progetto preliminare vengono qui aggiornate con i risultati delle indagini (rilievi piezometrici, correntometri, analisi chimiche delle acque) e delle elaborazioni svolte utilizzando i risultati delle campagna di monitoraggio *ante-operam*, iniziate nel Dicembre del 2016.

Il documento è diviso in una parte A, in cui sono riportate le informazioni generali sul corpo idrico sotterraneo ricevente (a scala del corpo idrico), in una parte B di dettaglio relativo alle caratteristiche del sito di ricarica (a scala di sito), ed in una parte C, in cui sono riportate le informazioni sul corpo idrico donatore. Una ulteriore parte D dettaglia le opere tecniche da realizzare, l'analisi economica, l'analisi di rischio ed i sistemi di monitoraggio *post-operam*, il piano di gestione e manutenzione, il sistema di allerta ed il piano di emergenza. Completano il presente progetto una serie di elaborati tecnici ed allegati.

PARTE A

Informazioni generali sul corpo idrico sotterraneo ricevente (a scala del corpo idrico)

In questa sezione sono descritte le informazioni sull'acquifero della Val di Cornia, con particolare riferimento agli andamenti dei livelli piezometrici nell'acquifero e all'andamento dei parametri chimici. Per quanto riguarda gli andamenti piezometrici, ai fini della redazione del presente progetto esecutivo, sono state utilizzate le seguenti tipologie di informazioni:

- livelli piezometrici derivanti dai sensori della rete del Servizio idrologico regionale;
- monitoraggi a cadenza mensile nell'area prevista per la realizzazione dell'impianto di ricarica;
- monitoraggio di un'area ampia (circa 12 km^2, compresa tra località Forni, San Lorenzo Case Due, Casette di Cornia e Casalappi) con cadenza almeno stagionale.

Le tre tipologie di informazioni acquisite sono riportate in Allegato 1. In questa sezione si presentano i dati del Servizio Idrologico Regionale, mentre le informazioni di dettaglio relative all'area di interesse sono presentate nella Parte B del presente progetto.

1. Andamento dei livelli piezometrici

Ai fini dell'approvvigionamento idrico idropotabile, irriguo e industriale, l'acquifero di principale interesse pratico della Val di Cornia è contenuto nei depositi permeabili del Quaternario, costituiti da livelli di ghiaie alluvionali oloceniche, legati alla deposizione del Fiume Cornia, e dai livelli di sabbie/arenarie e ghiaie pleistoceniche della zona di S. Vincenzo-Piombino. Entrambe le unità idrostratigrafiche giacciono su di un substrato profondo, che si differenzia da zona a zona. Lo schema è il seguente (Regione Toscana 2003):

- un acquifero superficiale freatico-semiconfinato, spesso sospeso, di modesto spessore e discontinuo nella bassa pianura;
- un sistema acquifero confinato multistrato, costituito da più livelli (in genere 4) ghiaiosi acquiferi con interposti depositi discontinui limoso-argillosi e argille di bassa o bassissima permeabilità (Ghezzi et al., 1993).

In Fig. 1.1 è riportato l'andamento della superficie piezometrica rilevato nell'Aprile 2011 (Regione Toscana, 2012) da cui si può rilevare come l'area di Forni (Comune di Suvereto) costituisca una importante area di ricarica della falda.

Le attività produttive industriali, l'irrigazione e la domanda idropotabile hanno generato un disequilibrio del bilancio idrogeologico che ha influenzato il campo di moto delle acque sotterranee, con un progressivo abbassamento della falda e arretramento

dello zero idrometrico verso l'interno (Fig. 1.2). L'abbassamento più consistente, nell'ordine di 12 m, si è avuto nell'area più interna della bassa pianura del Cornia.

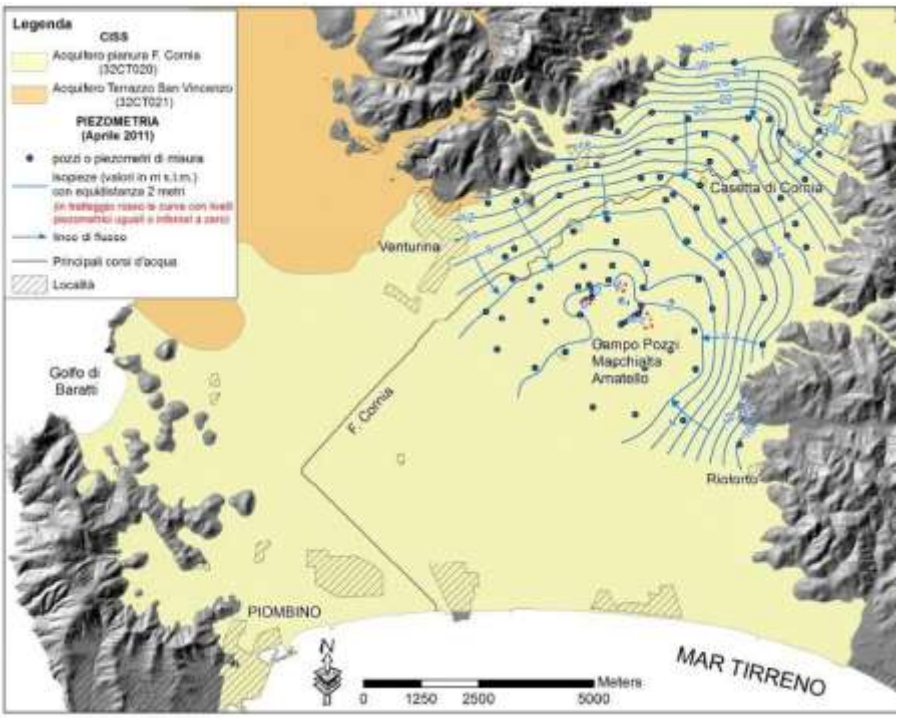


Fig. 1.1. Andamento delle isopieze nell'Aprile 2011 (da Regione Toscana 2012).

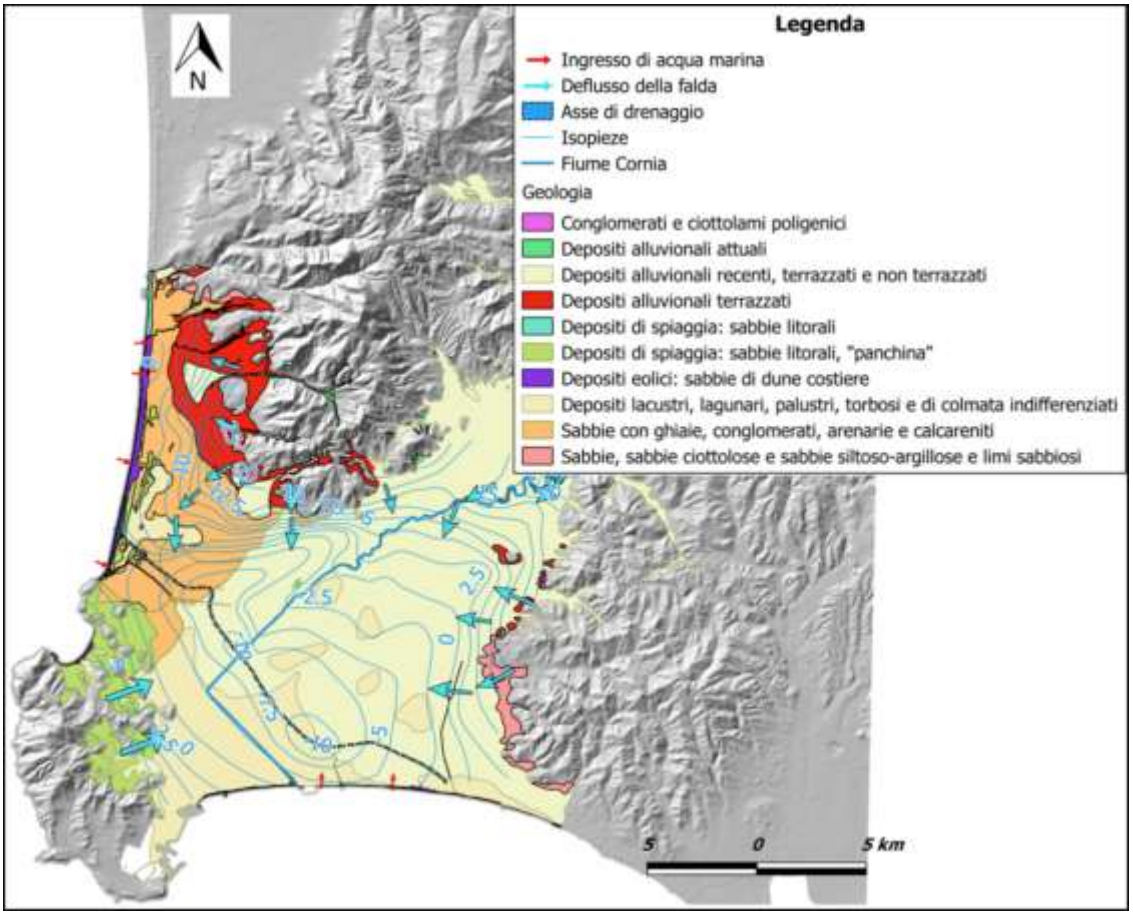


Fig. 1.2. Caratterizzazione geologica sulla base del Continuum geologico Regionale (CNR – IGG e Consorzio LaMMA, 2009b; modificato) e digitalizzazione della Carta Idrogeologica della Pianura di Piombino (Ghezzi et al., 1995). Le frecce rosse indicano gli ingressi di acqua marina nell'acquifero.

DI seguito si illustrano le informazioni derivate dalla rete di piezometri del Servizio Idrologico Regionale.

1.1 Piezometri della rete SIR-TOSCANA

I piezometri della rete SIR-TOSCANA (http://www.sir.toscana.it/ricerca-dati) nell'area di studio sono cinque (Fig. 1.3); un ulteriore piezometro si trova nella zona di San Vincenzo, area non di interesse per gli scopi del presente intervento. Le informazioni riportate sono accessibile dal sito web: http://www.sir.toscana.it/ Per la loro distribuzione areale, i piezometri sono stati suddivisi in 2 sottozone: una zona centrale comprendente i piezometri di Amatello, Montioncello e Venturina ex Aeroporto e una a sud con i piezometri Cigri 14 e La Sdriscia. Il periodo per cui si riportano osservazioni va dal 2010 al 2017, intervallo temporale in cui esistono misure comuni a tutti i piezometri.

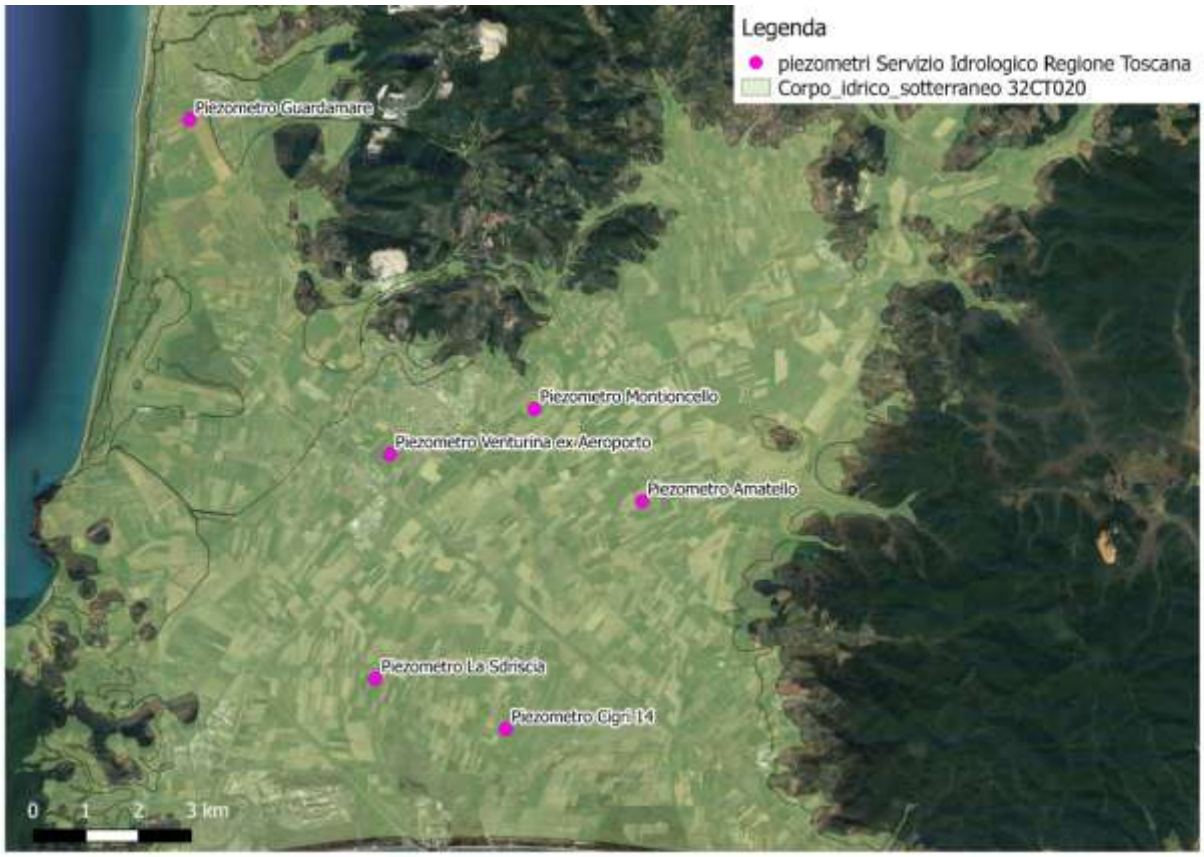


Fig. 1.3. Posizione dei piezometri della rete SIR-TOSCANA.

I piezometri della porzione centrale della Valle del Cornia mostrano valori tra loro coerenti, e presentano generalmente un alto piezometrico annuale legato al periodo della ricarica ed un successivo esaurimento di questo massimo nella stagione estiva (Fig. 1.4). Si può osservare come la stazione di Venturina ex Aeroporto presenti valori superiori a 0 m s.l.m. solo in occasione dei periodi di ricarica del 2014 e 2015. Per quanto riguarda la parte meridionale della pianura del Fiume Cornia, presso la stazione Cigri 14 la superficie piezometrica è nella maggiore parte dei casi al di sotto del livello del mare, mentre la stazione di La Sdriscia, posta a 4.4 m s.l.m. risulta inferiore allo 0 piezometrico solo nel periodo 2011-2012 (Fig. 1.5).

Gli andamenti piezometrici presentati mostrano quindi la sensibilità dell'acquifero della valle del Cornia all'intrusione di acqua marina.

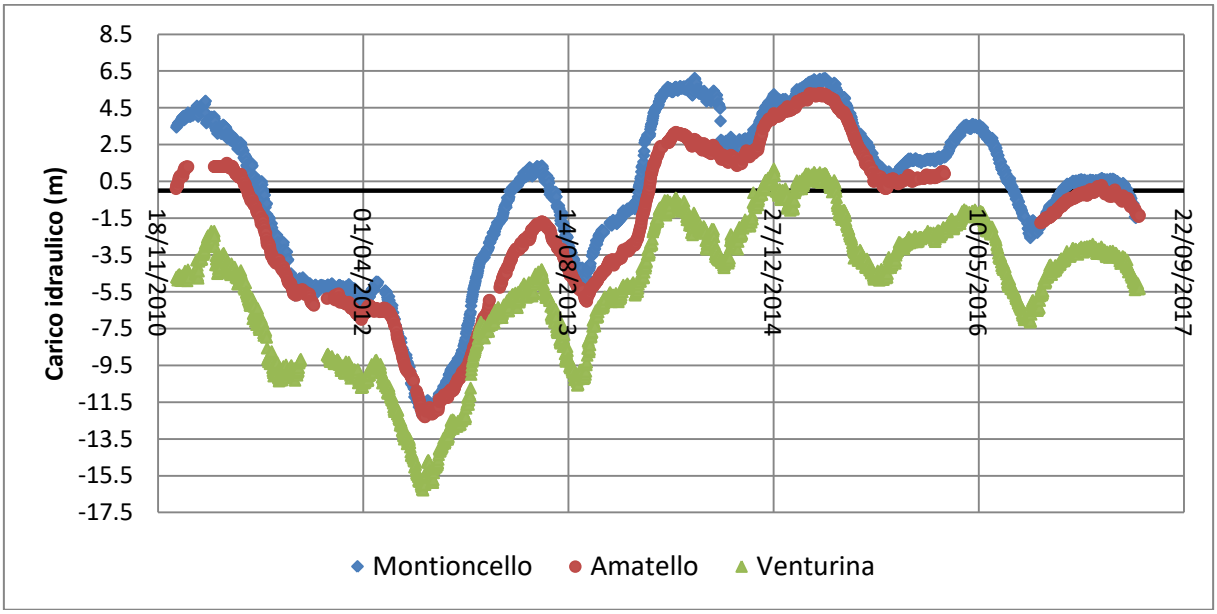


Fig. 1.4. Andamento dei piezometri dell'area centrale (m sul medio mare).

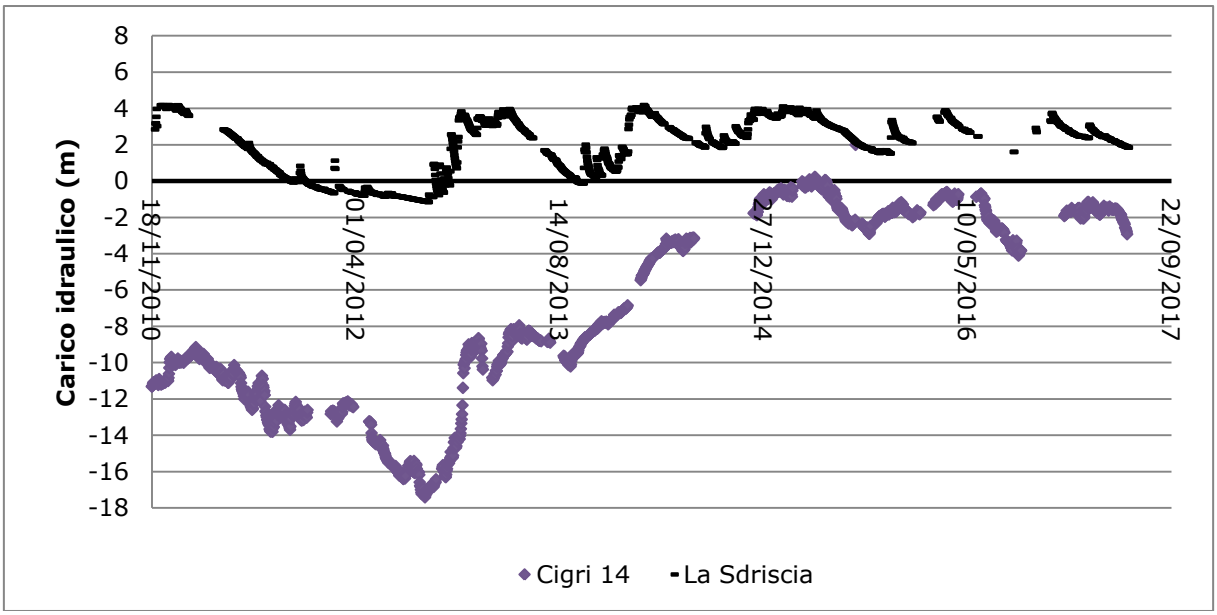


Fig. 1.5. Andamento dei piezometri dell'area costiera meridionale.

2. Andamento delle portate delle sorgenti idrogeologicamente connesse al corpo idrico sotterraneo

La Fig. 2.1 mostra le sorgenti censite dal Servizio Idrologico della Regione Toscana e la zona interessata dall'intervento di ricarica. Dalla Fig. 2.1 è possibile osservare come nell'area interessata dall'intervento di ricarica dell'acquifero non sono presenti sorgenti idrogeologicamente connesse all'acquifero. Si ritiene che le sorgenti presenti e a monte dell'impianto proposto non possano essere in alcun modo influenzate dall'azione della ricarica. La maggior parte delle sorgenti vengono infatti a trovarsi in corrispondenza dei rilievi Meso-Cenozoici o al contatto tra questi ultimi e i depositi olocenici, a notevole distanza dalla zona interessata.

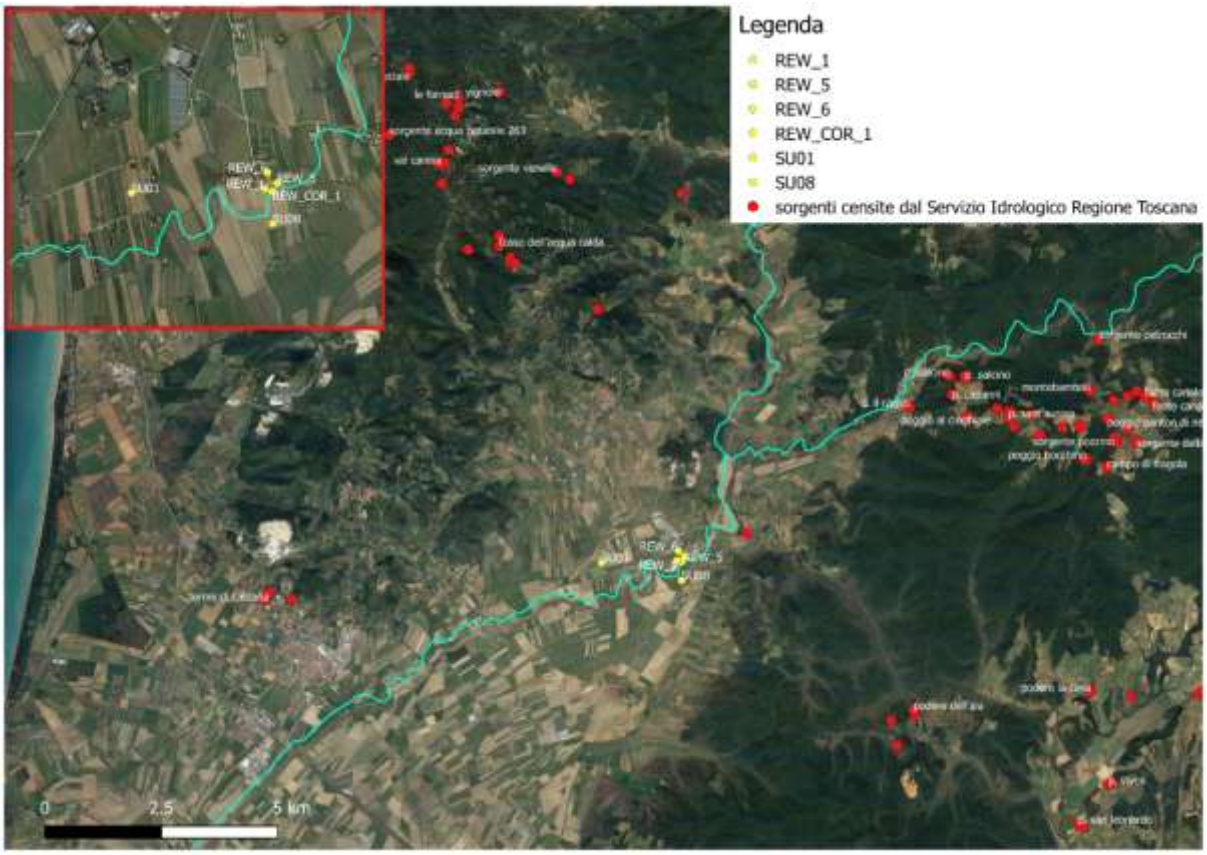


Fig. 2.1. Mappa delle sorgenti censite dal SIR-TOSCANA nell'area della Val di Cornia.

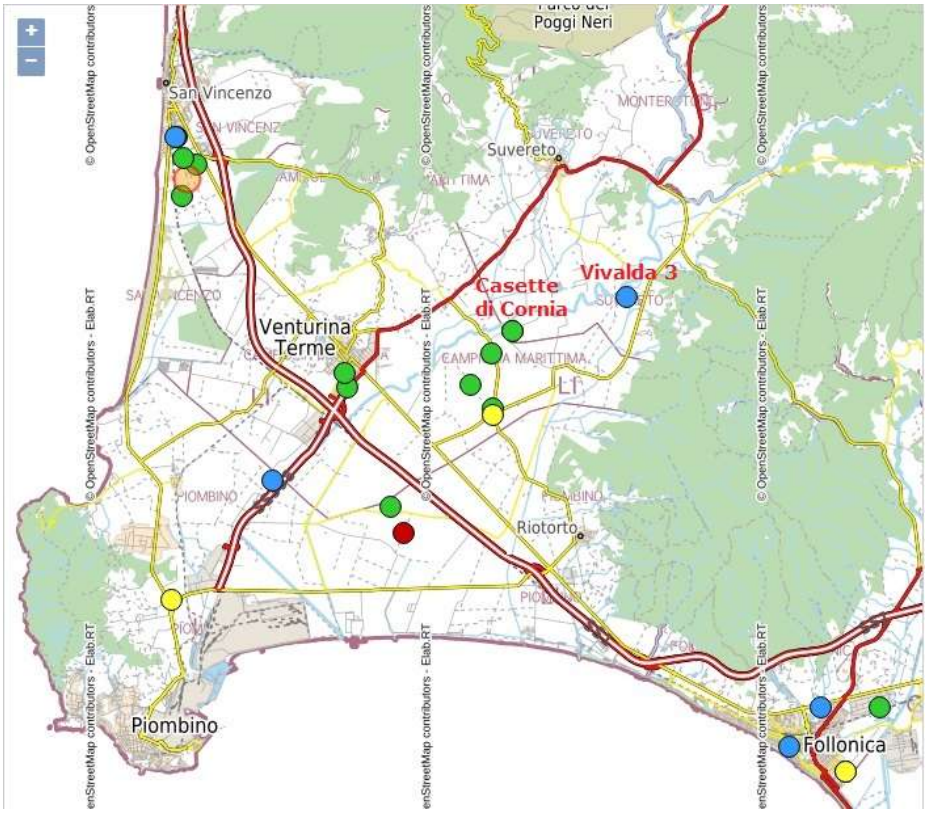
3. Capacità d'immagazzinamento

Date le caratteristiche di acquifero localmente non confinato e composto da sedimenti ghiaiosi in matrice sabbioso-limosa, nell'area di intervento la componente nettamente preponderante nella capacità d'immagazzinamento dell'acquifero consiste nella potenzialità specifica (*specific yield*), ossia il rapporto tra il volume idrico che può essere drenato per gravità da un volume saturo di acquifero e il volume totale dell'acquifero. Acquiferi composti dai sedimenti del tipo individuato nell'area di Forni sono generalmente molto capaci, caratterizzati da elevati valori di resa specifica compresi tra 10% e 40% (Freeze and Cherry, 1979, Spitz e Moreno,1996, Fetter, 2001). Per le caratteristiche locali del sedimento nell'area di intervento, ghiaie eterogenee, elevata frazione sabbiosa della matrice, si ritiene che la capacità di immagazzinamento sia intorno al 30%.

4. Andamento temporale dei parametri chimici significativi

4.1 Andamento dei parametri chimici significativi per l'acquifero della Val di Cornia

Grazie alla banca dati del Sistema informativo Regionale Ambientale della Toscana (SIRA), interamente reperibile on line al sito http://sira.arpat.toscana.it, è possibile visualizzare valori e trend dei singoli parametri monitorati da ARPAT. La rete di monitoraggio delle acque sotterranee ARPAT vede la presenza di 12 stazioni di Monitoraggio Ambientale Acque Sotterranee (MAT) nella Val di Cornia, di cui una, denominata Vivalda 3, MAT-P333, è posta nei pressi del sito dell'impianto di ricarica, in sinistra idrografica (Fig, 4.1) del Fiume Cornia. La seconda stazione di monitoraggio ARPAT considerata è Casette di Cornia (MAT-P140 fino al 2015, e MAT-P807 dal 2016). Le tabelle dei valori medi annuali dei parametri per Vivalda 3 e Casette di Cornia sono riportate in Allegato 2 (Tabelle A2.1 ad A2.6).



Fig, 4.1. Stazioni di monitoraggio delle acque sotterranee ARPAT (http://sira.arpat.toscana.it/sira/inspire/view.php?dataset=mat_stato). Legenda del colore delle stazioni: blu) stato chimico buono; verde) stato chimico buono, con alcuni parametri superiori alle normative per cause naturali; giallo) stato chimico generalmente buono, scarso per singoli parametri; rosso) stato chimico scarso.

I dati della rete di monitoraggio dell'ARPAT indicano che, nella porzione centrale della pianura, nell'area dei comuni di Campiglia Marittima e Suvereto, lo stato chimico delle acque è sostanzialmente BUONO, sebbene, nella maggioranza dei casi, con concentrazioni di fondo naturali di Boro e Arsenico al di sopra dei limiti normativi (http://sira.arpat.toscana.it) (Tab. 4.1). In misura minore, ARPAT ha riscontrato valori di fondo naturali superiori ai limiti normativi anche per cloruro e solfato, nei pressi della

località di Venturina Terme, e di Ferro, presso Casette di Cornia. La stazione di monitoraggio di Vivalda 3 presenta un unico parametro superiore ai limiti di legge, il ferro, limitatamente all'anno 2015, registrando per il resti uno stato chimico BUONO continuo, nel periodo 2014-2016 (Allegato 2, Tabelle A2.4 a A2.6). In tutti i casi, il monitoraggio delle acque sotterranee non presenta valori di mercurio superiori al limite normativo di 1 μg/l.

					Valori medi annuali			
Comune	**Stazione**	**ID Stazione**	**Parametro**	**unità misura**	**2014**	**2015**	**2016**	**valore soglia**
Camp. Marit.	COLTIE 4*	MAT-P473	Cloruro	mg/l	130	150	**291**	250
			Solfato	mg/l	394.5	348	**364**	250
Camp. Marit.	Macchialta 4	MAT-P330	Boro	µg/l	**3125**	**3500**	**3100**	1000
			Arsenico	µg/l	**11.35**	**12**	**16**	10
Camp. Marit.	Amattello 1	MAT-P329	Boro	µg/l	**2985**	**2600**	**2450**	1000
Camp. Marit.	Roviccione 4	MAT-P138	Boro	µg/l	**2275**	**2250**	**1900**	1000
			Arsenico	µg/l	**14**	**12**	**12.5**	10
Suvereto	Casette di Cornia	MAT-P140	Boro	µg/l	**2905**	**2400**	**2200**	1000
			Arsenico	µg/l	**25.5**	**22**	**21.5**	10
			Ferro	mg/l	0.008	**0.216**	0.005	0.2
Suvereto	Vivalda 3	MAT-P333	Ferro	mg/l	0.06	**0.22**	0.03	0.2

Tab. 4.1. Determinazioni ARPAT dei parametri che, nei territori dei comuni di Campiglia Marittima e Suvereto, durante il triennio 2014 – 2016 hanno avuto concentrazioni annuali medie superiori ai valori soglia. ARPAT definisce queste concentrazioni causate da fondi naturali. *Per la stazione COLTIE 4 non è disponibile il 2014, sono riportati i valori del 2013.

4.2 Andamento dei parametri chimici significativi per il Fiume Cornia

Come riportato nel Progetto preliminare, il tratto d'interesse del Fiume Cornia per questo lavoro ricade all'interno del Corpo Idrico R000TC091fi2 denominato Fiume Cornia Medio e tipizzato come 11SS2N (D.G.R.T. 937/2012), ed è classificato dal Piano di Gestione del Distretto Appennino Settentrionale approvato nel 2010 in Stato Ambientale SUFFICIENTE (Stato Chimico BUONO e Stato Ecologico SUFFICIENTE) con obiettivo BUONO al 2021. Nonostante lo Stato Chimico BUONO, siano state rilevate alterazioni a carico della presenza di Mercurio (Hg).

Sul Fiume Cornia, la rete di monitoraggio dell'ARPAT ha un'unica stazione di Monitoraggio Acque Superficiali (MAS), la MAS-078, posta nel territorio di Suvereto, subito a valle del sito dell'impianto di ricarica (Fig. 4.2). I dati forniti dalla banca dati del SIRA indicano uno stato chimico BUONO per tutti i parametri monitorati nella stazione MAS-078, sebbene siano riportate alterazioni per il Mercurio, avvenute nel biennio 2013-2014 (Fig. 4.3). In tale periodo, si è rilevata la presenza di Hg in concentrazioni superiori la soglia normativa. Dal 2015 in poi, ARPAT ha determinato valori di mercurio sempre

inferiori alle concentrazioni soglia di 0.03 μg/l. Nel periodo gennaio 2015 fino ad aprile 2017, lo stato chimico del Fiume è quindi risultato di grado BUONO per tutti i parametri.

Fig. 4.2. Stazione MAS-078 dell'ARPAT (in verde), e zona del sito di ricarica (in rosso). Modificato da SIRA ARPAT (http://sira.arpat.toscana.it/sira/inspire/view.php?dataset=mas_schim_fiumi) .

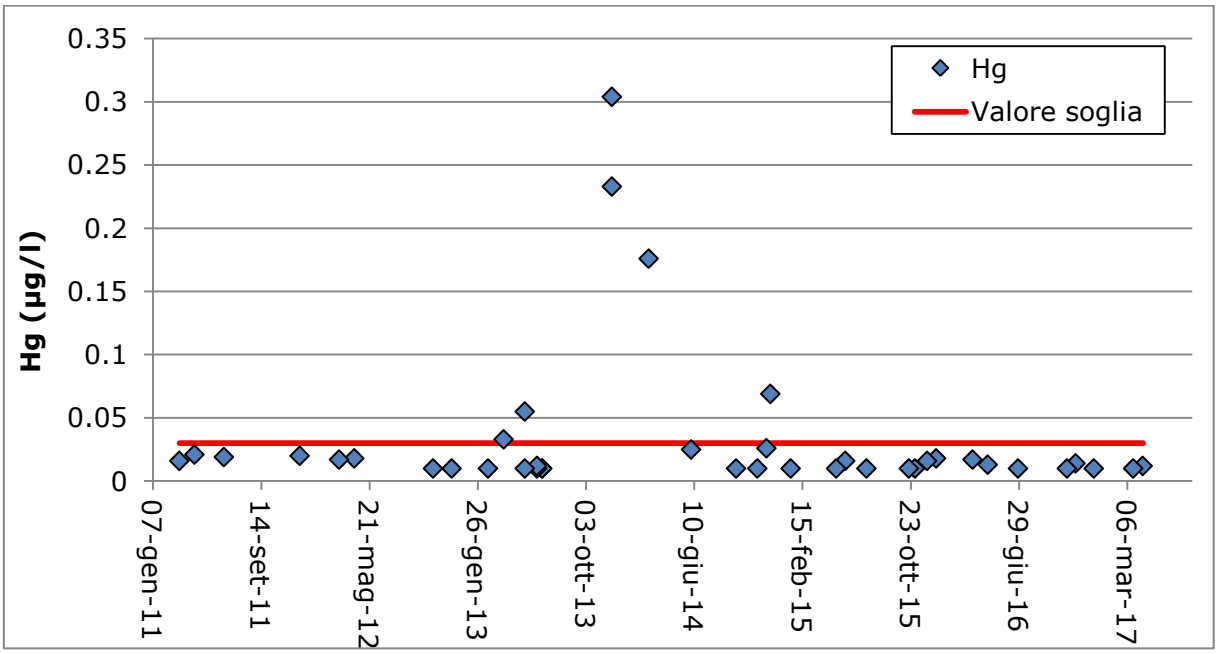


Fig. 4.3. Determinazioni dell'ARPAT del mercurio nella stazione MAS-078.

La stazione di monitoraggio in oggetto si trova a valle della confluenza con il Fosso Ripopolo; tuttavia, date le basse portate del Ripopolo, rispetto a quelle del Fiume Cornia, si ritiene, che l'apporto di tali acque non possa modificare significativamente la chimica del Fiume Cornia. Per tale motivo, tale punto può essere utilizzato per monitorare la chimica delle acque del Fiume Cornia.

5. Informazioni sui fenomeni di subsidenza registrati nella Val di Cornia e interazioni con il sistema di ricarica controllata di Suvereto

Le elevate intensità dei prelievi idrici dall'acquifero hanno causato numerosi fenomeni di subsidenza, registrati negli anni, in alcune aree della Pianura del Cornia.
Come descritto precedentemente nella sezione 2 la pianura della Val di Cornia è costituita da depositi alluvionali, palustri, lagunari e cordoni dunali riferibili all'Olocene di notevole spessore. La sedimentazione in ambiente alluvionale recente, specialmente nelle zone costiere, è fortemente soggetta a eteropie orizzontali, ma soprattutto verticali legate alle diverse fasi energetiche dei fiumi nel tempo. Questo comporta l'alternanza di materiali ghiaioso-sabbiosi a argilloso, argilloso-limosi. Questi ultimi presentano caratteristiche geotecniche suscettibili a cedimenti/compattazioni, specialmente se di età geologica recente e che portano a una riduzione dell'indice dei vuoti ed aumento della densità relativa. Questo fenomeno conosciuto con il nome generico di subsidenza può essere ricondotto nell'area della pianura del Fiume Cornia ad un aumento delle pressioni efficaci verticali agenti indotte da abbassamenti della falda. Le prime notizie circa il fenomeno della subsidenza in quest'area si hanno a partire dagli anni 80 e maggiormente legate alle zone costiere, in particolare nel comune di Piombino dove la richiesta idrica era maggiore. Qui, rilievi del periodo 1951-1981 prodotti dal Prof. Palla dell'Istituto di Geodesia e Fotogrammetria dell'Università di Pisa indicano velocità di abbassamenti del suolo di circa 1 cm/anno (Bartolini et al., 1989). Il fenomeno si è spostato nel tempo anche nella zona centrale della piana nell'area di Casalpiano (Comune di Campiglia m.ma), dove i cedimenti sono stati calcolati in circa 10 cm in 4 anni (GetasPetrogeo, 1999) e in parte nel comune di Suvereto a partire dalla metà degli anni 90. Infatti, a partire dal 1996-1997 sono stati registrati diffusi dissesti anche nella parte centrale della piana che hanno portato a lesioni in molti manufatti e in minor parte in quello di Piombino e Suvereto. La concentrazione maggiore dei dissesti, come riportato nel lavoro GetasPetrogeo (1999), era localizzata nel comune di Campiglia Marittima e in particolare in località Bandita, Casalpiano con un totale di 21 manufatti lesionati; 6 erano invece i manufatti lesionati nel comune di Piombino e solo 1 nel comune di Suvereto. Nel comune di Suvereto tuttavia non ci sono prove certe che riconducano gli abbassamenti del suolo alle diminuzioni del livello piezometrico della falda.

Inoltre, risulta verosimile che il processo di subsidenza sia più marcatamente dovuto ad un eccessivo sfruttamento degli acquiferi profondi confinati (Sbrilli, 2002). A dimostrazione di ciò infatti nella zona di Venturina, laddove è presente la più alta concentrazione di pozzi ad uso domestico, che prelevano dalla falda superficiale, non si hanno fenomeni di lesioni indotti da subsidenza. Sostanzialmente il fenomeno della subsidenza ha seguito l'andamento dell'abbassamento della piezometria (Sbrilli, 2004). Questo processo può aggravarsi in anni particolarmente siccitosi che non garantiscono

un'adeguata ricarica naturale delle falde, messe sotto stress per via della pressante domanda idrica.

All'interno dell'intervento previsto nell'ambito del progetto Life REWAT, si stima un' immagazzinamento ottimale nell'acquifero di circa 600000 m^3 all'anno. Considerando in circa 280 km^2 la superficie della Val di Cornia, a valle dell'impianto di ricarica, e considerando una porosità minima del 10%, un immagazzinamento ottimale "istantaneo" di 0.6 Mm^3 porterebbe al massimo ad una risalita della falda di 2 cm all'anno. Dati i quantitativi immessi in rapporto alla velocità dei deflussi sotterranei, si ritiene che l'impianto di ricarica fornisca benefici limitati relativamente al problema della subsidenza.

PARTE B

Informazioni sul corpo idrico sotterraneo a scala di sito

Vengono presentate in questa sezione le informazioni richieste nell'Allegato 1 del DM 100/2016 riguardo le caratteristiche alla scala di sito. Tali informazioni sono relative alla pedologia, le caratteristiche idrogeologiche e le relazioni tra il corpo idrico superficiale e quello sotterraneo.

6. Informazioni sulla pedologia dell'area

Da un punto di vista pedo-litologico, l'area prevista per l'impianto di ricarica, è essenzialmente composta da sedimenti continentali alluvionali olocenici, caratterizzati da alternanza di strati di materiali grossolani sabbiosi-ghiaiosi, spessi fino a 20 m nei pressi dell'area di sito, e strati di materiali fini limoso-argillosi (Barazzuoli et al. 1999; Pennisi et al., 2008).

Come detto nel progetto preliminare, nell'area ASA spa ha recentemente condotto un'analisi dei dati bibliografici e cartografici pregressi, e un rilevamento geologico di campagna di dettaglio, alla scala 1:5000, andando ad osservare anche tramite carotaggi a mano (sino alla profondità di circa un metro), ove possibile, le differenze litologiche nei depositi alluvionali nei loro livelli superficiali. Dal punto di vista geomorfologico, nell'area indagata le alluvioni attuali e recenti del Fiume Cornia sono organizzate in un sistema meandriforme in evoluzione; le aree di versante sono limitate ad alcuni settori marginali dell'area, dal punto di vista morfologico non presentano elementi di particolare interesse di contrasto per lo scopo della ricerca.

I depositi olocenici presenti nell'area di studio comprendono depositi naturali come i detriti di versante, i depositi alluvionali attuali, i depositi alluvionali recenti terrazzati e non terrazzati e i depositi eluvio-colluviali. Sono stati analizzati e distinti in particolare i depositi alluvionali, sia dal punto di vista genetico che granulometrico. Si evidenzia che lo strato sub-superficiale indagato è, in molti casi, rielaborato e alterato dalle attività antropiche, fino ad una profondità di circa un metro. Le classi granulometriche quindi rispecchiano le caratteristiche di un deposito a volte rimaneggiato e alterato. Nei tratti di alveo attualmente in evoluzione sono presenti estesi depositi di ghiaia (Fig. 6.1) mentre nel settore meridionale sono presenti depositi argilloso-limosi. Nell'area dell'intervento sono presenti ghiaie in matrice sabbiosa, eterometriche (fino a decine di cm di diametro) e poligeniche.

Fig. 6.1. Particolare delle alluvioni recenti del Fiume Cornia.

7. Caratteristiche idrogeologiche del sito, conducibilità idraulica orizzontale della falda e verticale dell'insaturo

Relativamente all'area di studio, Barazzuoli et al. (1999) presentano 2 sezioni idrostratigrafiche, denominate GG' e PP', con l'ultima posta nei pressi dell'area di intervento (Fig. 7.1). Questi Autori riportano per il sondaggio n. 8, in prossimità dell'area di intervento, uno spessore permeabile di ghiaie in matrice sabbiosa e limosa pari a circa 15 m, al cui tetto si trova, su larga parte del dominio, un sottile strato di limo (Fig. 7.2). In prossimità dell'area di Forni, l'acquifero è non confinato, ed è connesso idraulicamente con il Fiume Cornia. Dai risultati delle prove di portata eseguite da ASA spa nei propri pozzi idropotabili ed in particolare, in Barazzuoli et al. (2008), al sistema acquifero è attribuito un coefficiente di conducibilità idraulica variabile tra 10^{-3} e 10^{-4} m/s.

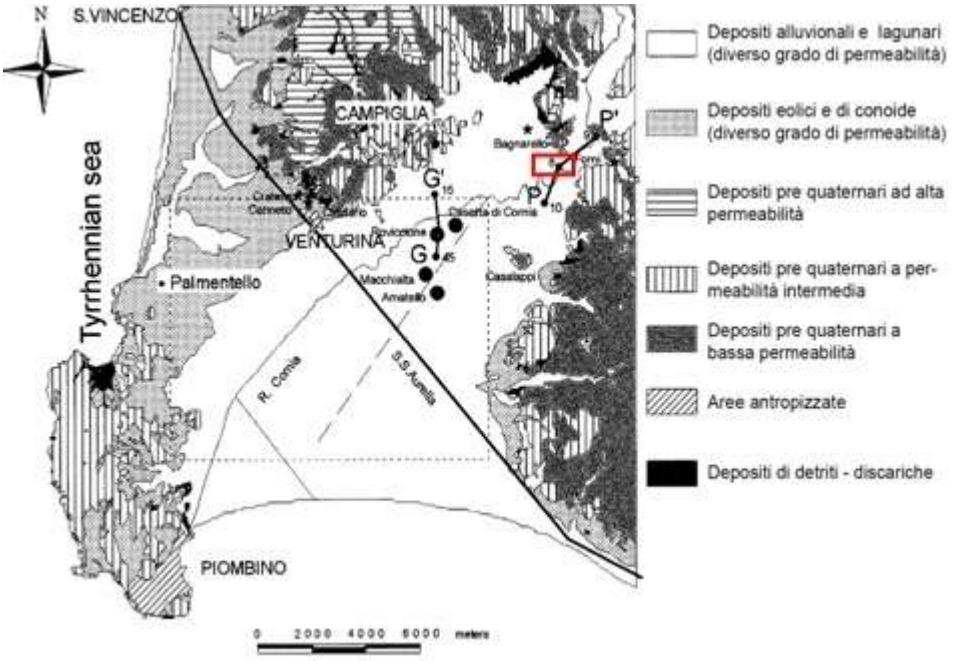


Fig. 7.1. Carta idrogeologica e sezioni G'G e P'P', con in rosso l'area del sito di ricarica. Modificata da Barazzuoli et al., 1999.

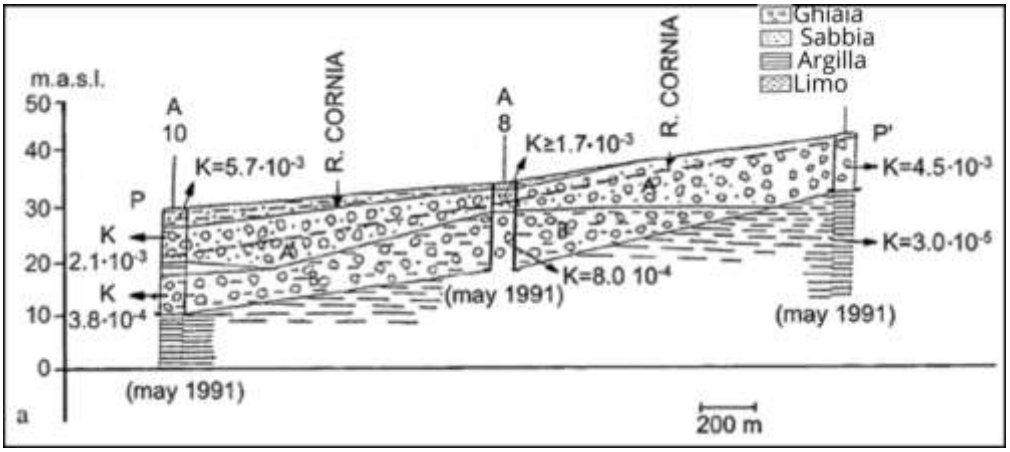


Fig. 7.2. Sezione PP' della Pianura del Fiume Cornia con descrizione qualitativa delle permeabilità delle diverse formazioni (Barazzuoli et al., 1999).

Nell'area direttamente contigua al sito dell'impianto di ricarica, prove geoelettriche eseguite nel 2011 in località Forni dal Centro di Geotecnologie dell'Università di Siena, confermano queste osservazioni, riportando uno spessore dei sedimenti ghiaiosi fino ad oltre 20 metri su stese poste in prossimità dell'area di intervento (Fig. 7.3.a; CGT, 2011). In particolare, i profili geolettrici PP' 16 (Fig. 7.3.b) e PP' 17 (Fig. 7.3.c), posti in prossimità della vasca d'infiltrazione, mostrano come lo spessore degli strati ghiaiosi siano continui e con una potenza fino a 30 m.

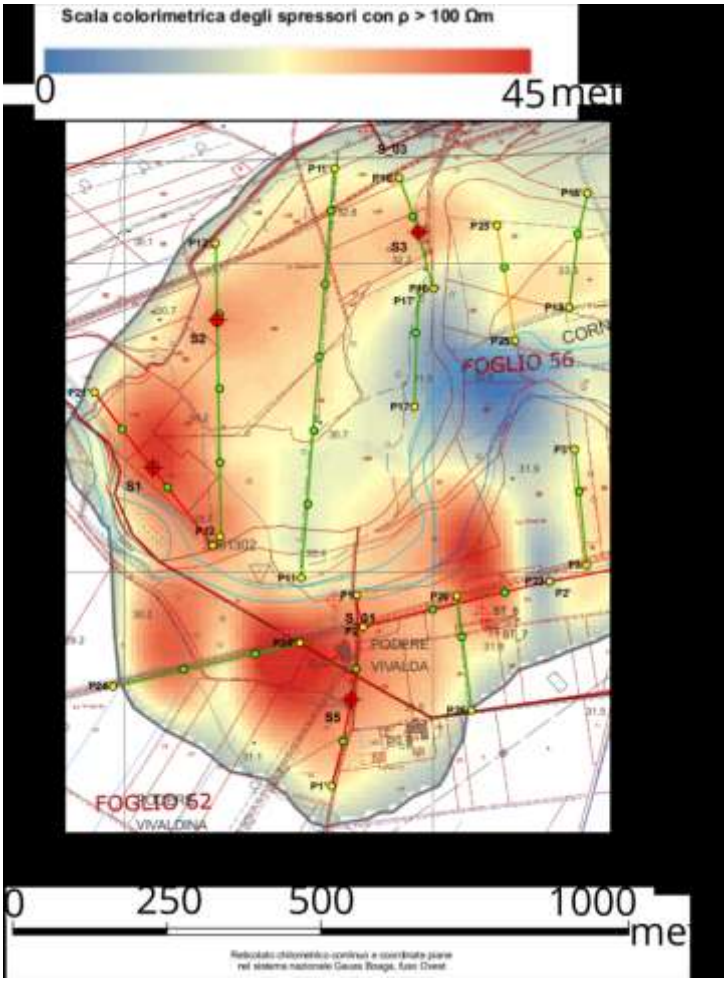


Fig. 7.3.a Carta delle profondità dei sedimenti ghiaiosi, con resistività superiore a 100 Ohm * m, in prossimità dell'area di ricarica (modificata da CGT, 2011).

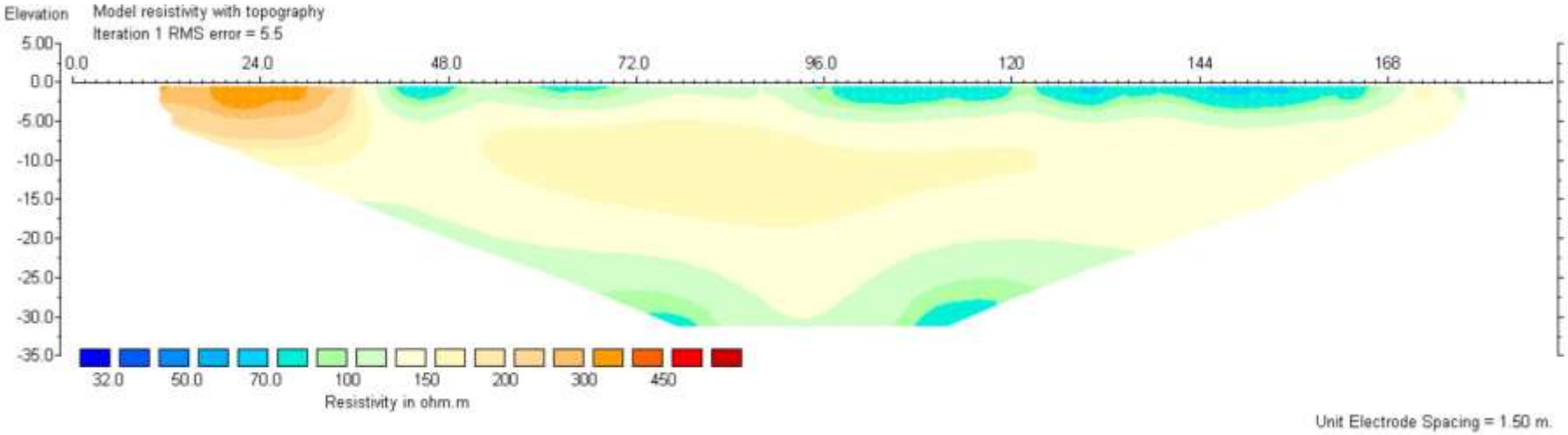


Fig. 7.3.b Profilo geoloettrico PP'16, con scala della resistività (modificata da CGT, 2011).

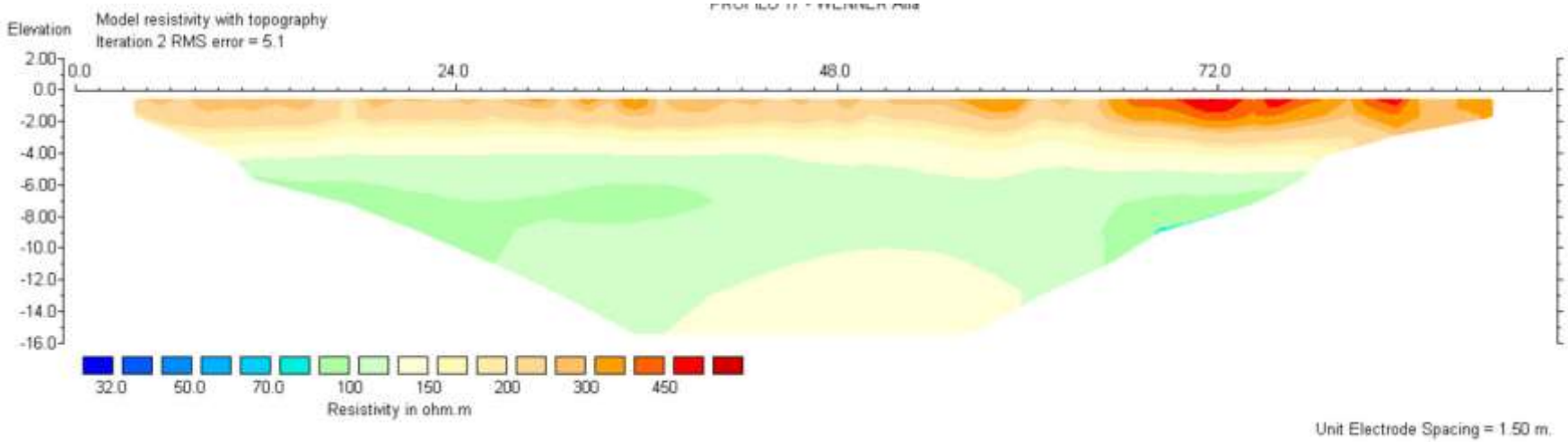


Fig. 7.3.c Profilo geoloettrico PP'17, con scala della resistività (modificata da CGT, 2011).

Riguardo la conducibilità idraulica verticale della zona insatura nel sito, sono state svolte 4 prove infiltrometriche sui depositi fini a carico variabile mediante infiltrometri a doppio anello, con la metodica ASTM D3385-9403-2009 (Fig. 7.4). Le prove sono state condotte fino al raggiungimento di una capacità d'infiltrazione costante, raggiunta in circa 2 ore (valori riportati in Allegato 3). La pendenza della retta nel tratto in cui gli abbassamenti sono costanti nel tempo ha corrisposto al tasso d'infiltrazione verticale nell'area (Fig. 7.5). Come riportato in letteratura (Fathenia, 2013), il tasso d'infiltrazione è utilizzabile per stimare la conducibilità idraulica verticale attraverso la formula empirica

$$K = \mathbf{0.02}\boldsymbol{D}^{*}\ \mathrm{I} - \mathbf{0.038}^{*}\boldsymbol{I}$$

Dove:

K: conducibilità idraulica verticale satura (cm/sec)

D: diametro anello interno (30 cm)

I: tasso di infiltrazione (cm/sec)

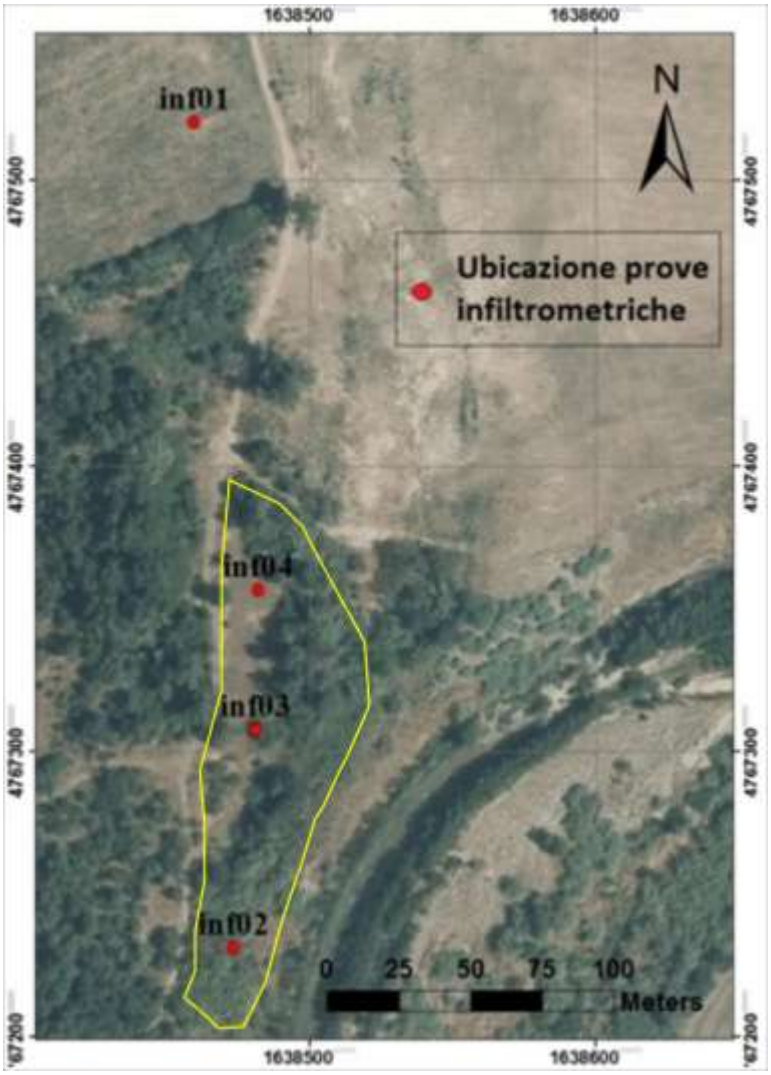


Fig. 7.4. Posizione delle prove infiltrometriche, eseguite nell'area del sito (linea continua: perimetro della vasca d'infiltrazione).

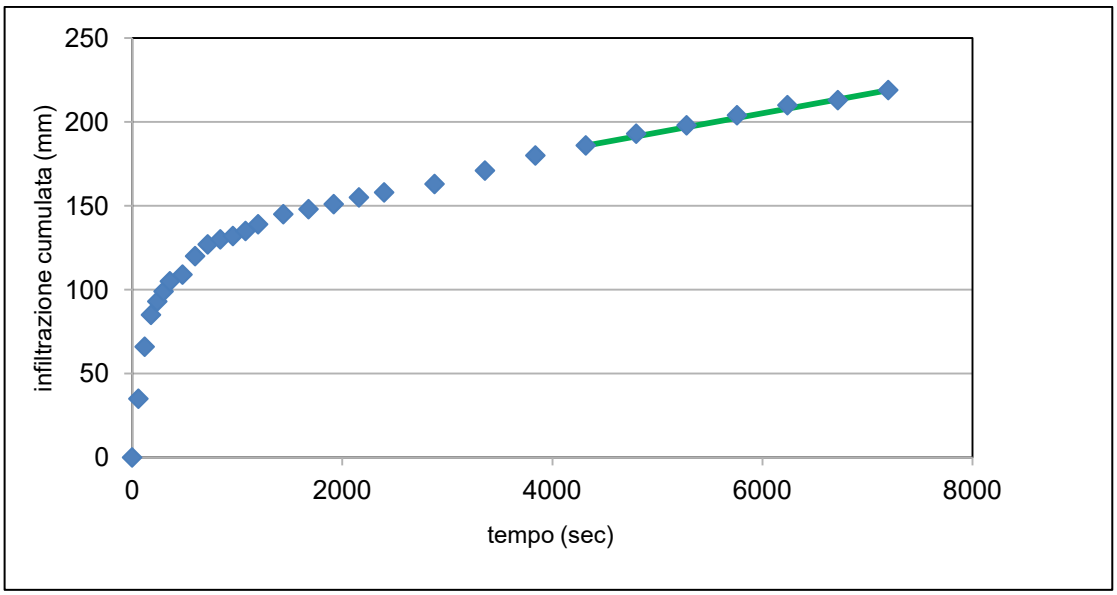


Fig. 7.5. Grafico dell'infiltrazione accumulata nel tempo relativa alla prova infiltrometrica "inf04". Il coefficiente angolare del segmento in verde rappresenta il tasso di infiltrazione

	Tasso di infiltrazione (m/sec)	Conducibilità idraulica verticale (m/sec)
inf01	1,04E-06	5,85E-07
inf02	4,63E-07	2,60E-07
inf03	5,68E-07	3,19E-07
inf04	1,16E-05	6,52E-06

Tab. 7.1. Risultati prove infiltrometriche.

I valori così ricavati mostrano valori di conducibilità idraulica riferibili a sabbie fini e sabbie limose, limi sabbiosi in accordo ai range riportati in letteratura (Tab. 7.1; Freeze e Cherry, 1974; Spitz e Moreno, 1996, Fetter, 2001); evidenza in accordo con le osservazioni effettuate nel corso delle prove sul campo e delle precedenti analisi.

8. Andamento del campo di moto delle acque sotterranee

Nella presente sezione si discutono le interazioni tra acque superficiali e sotterranee così come derivanti dalle indagini svolte a supporto della redazione del presente progetto esecutivo. In particolare si dettaglia l'andamento del campo di moto delle acque sotterranee, le relazioni con il corpo idrico superficiale e si riportano i risultati del monitoraggio chimico.

Come richiesto dall'Allegato 1 del DM 100/2016, nell'area di intervento è stato posto in essere un sistema di monitoraggio *ante-operam* per il rilievo discreto dell'andamento dei livelli piezometrici e della qualità delle acque sotterranee. Lo scopo di tale monitoraggio è quello di definire gli andamenti dei livelli piezometrici e lo stato chimico delle acque sotterranee e superficiali nei pressi dell'area di intervento. Per il rilevamento piezometrico sono stati inoltre utilizzati pozzi privati su di un'area più ampia, rispetto a quella dell'intervento e compresa a Nord-Est tra la località Forni e San Lorenzo, a Sud Ovest tra le località Case Due, Casette di Cornia e Casalappi. Ai punti di monitoraggio delle acque sotterranee, sono state aggiunte delle stazioni per il rilevamento della quota del pelo libero nel fiume, nei tratti a monte dell'impianto, e a valle dell'area in oggetto al fine di definire in dettaglio le relazioni acque superficiali sotterranee (Fig. 8.1).

In Tab. 8.1 sono riportati periodi di monitoraggio ed il numero di punti monitorati per le acque superficiali e sotterranee. I valori monitorati sono riportati nell'Allegato 1, Tabelle da A1.1 ad A1.6.

Nell'area di intervento, i piezometri REW 1, REW_VA2, REW_VA3 e REW_VA4 sono posti all'interno del basso morfologico che corrisponde alla vasca d'infiltrazione, mentre i piezometri REW6 e REW5 sono posti, rispettivamente, in fregio al Fiume Cornia e a Nord dell'impianto di ricarica. Infine, a partire da aprile 2017 sono stati utilizzati i paletti idrometrici, PA_11, PA_1, PA_2, PA_3, PA_4 e PA_6 per determinare il livello idrometrico discreto del Fiume Cornia (dati in Allegato 1, Tab. A1.7).

Campagna monitoraggio	valori h totali interpolati	n. punti CGT	n. punti SSSA	n. punti SIR	n. paletti stimati
12 aprile 2016	**11**		**5**		**6**
3 agosto 2016	**17**		**6**	**5**	**6**
novembre 2016	**56**	**45**		**5**	**6**
20 dicembre 2016	**17**		**6**	**5**	**6**
25 gennaio 2017	**17**		**6**	**5**	**6**
8 febbraio 2017	**50**	**39**		**5**	**6**
21 febbraio 2017	**17**		**6**	**5**	**6**
14 marzo 2017	**55**	**38**	**6**	**5**	**6**
12 aprile 2017	**17**		**11**	**5**	**1**
11 maggio 2017	**16**		**10**	**5**	**1**
22 maggio 2017	**17**		**11**	**5**	**1**
19 giugno 2017	**27**	**19**	**3**	**4**	**1**

Tab. 8.1. Date dei monitoraggi piezometrici svolti, numero di punti monitorati per le acque sotterranee e numero di misure stimate (s) o misurate (m) per le acque superficiali.

Le carte piezometriche presentate alle Figure Fig. 8.3, Fig. 8.4 e Fig. 8.5 riportano l'andamento del campo di moto delle acque sotterranee ricostruito, dai dati piezometrici provenienti dalla campagna di monitoraggio, tramite interpolazione (i dati impiegati, ossia le misure dai monitoraggi mensili nei punti REW6, REW5, REW1, REW_VA2, REW_VA3 e REW_VA4, le misure del pelo libero del fiume attraverso i paletti idrometrici ed i dati dal monitoraggio su area più vasta, sono disponibili nell'Allegato 1).

Nell'area compresa tra Forni e il sito oggetto dell'intervento è possibile osservare l'effetto della ricarica operato attraverso il contatto idraulico diretto tra il Fiume Cornia e le alluvioni ghiaiose legate alla presenza di paleoalvei di detto corso d'acqua. In prossimità del sito, in destra idrografica, la direzione principale di deflusso sotterraneo è E-W, confermando quindi il potenziale effetto dell'azione di ravvenamento dell'acquifero della Val di Cornia che potrà essere fornita dall'impianto di ricarica (Fig. 8.3 a Fig. 8.5). L'area di intervento presente un basso gradiente idraulico, rispetto ad esempio alla zona ad ovest dell'impianto, ad indicare la buona trasmissività dell'acquifero nell'area. Nel periodo monitorato, che comprende quasi un intero anno idrologico, andando dall'agosto 2016 fino al giugno 2017, si osserva una ricarica limitata, legata alle particolari condizioni delle precipitazioni dell'anno in corso, con innalzamenti dei livelli piezometrici intorno al metro. Dal monitoraggio effettuato nel mese di giugno 2017 (Fig. 8.5), mentre nell'area della ricarica gli abbassamenti sono limitati, si può invece osservare l'importante effetto dei prelievi ad uso irriguo ed idropotabile, che generano un abbassamento dell'ordine dei 6/10 metri, rispetto a Marzo 2016.

In sinistra idrografica, sempre in prossimità dell'area di intervento, le linee di flusso, caratterizzate da un gradiente idraulico più alto, seguono l'asse N-S. I risultati del monitoraggio concordano con quanto indicato dalla carta idrogeologica della pianura di Piombino (Ghezzi et al., 1995).

La Fig. 8.6 riporta gli andamenti del carico idraulico nei punti monitorati in prossimità o all'interno del sito previsto per la ricarica. In tali punti, il carico idraulico è pressoché costante nel tempo, per la forte influenza esercitata dalla prossimità del corso d'acqua.

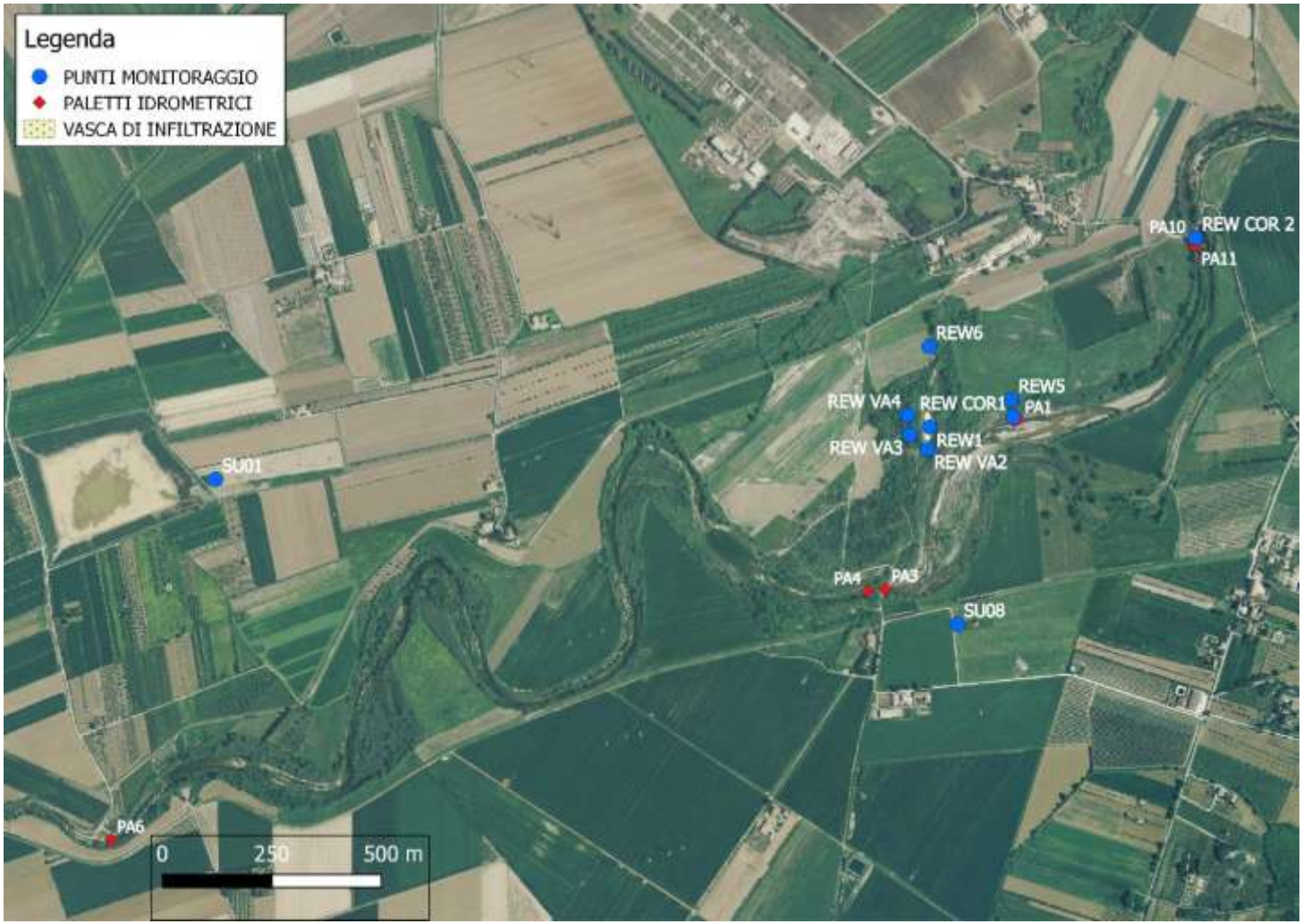


Fig. 8.1. Rete di piezometri e paletti idrometrici utilizzata per il monitoraggio *ante-operam* nell'area di interesse.

Fig. 8.2. Dettaglio della rete di piezometri e paletti idrometrici usata nel monitoraggio nei pressi dell'area d'interesse.

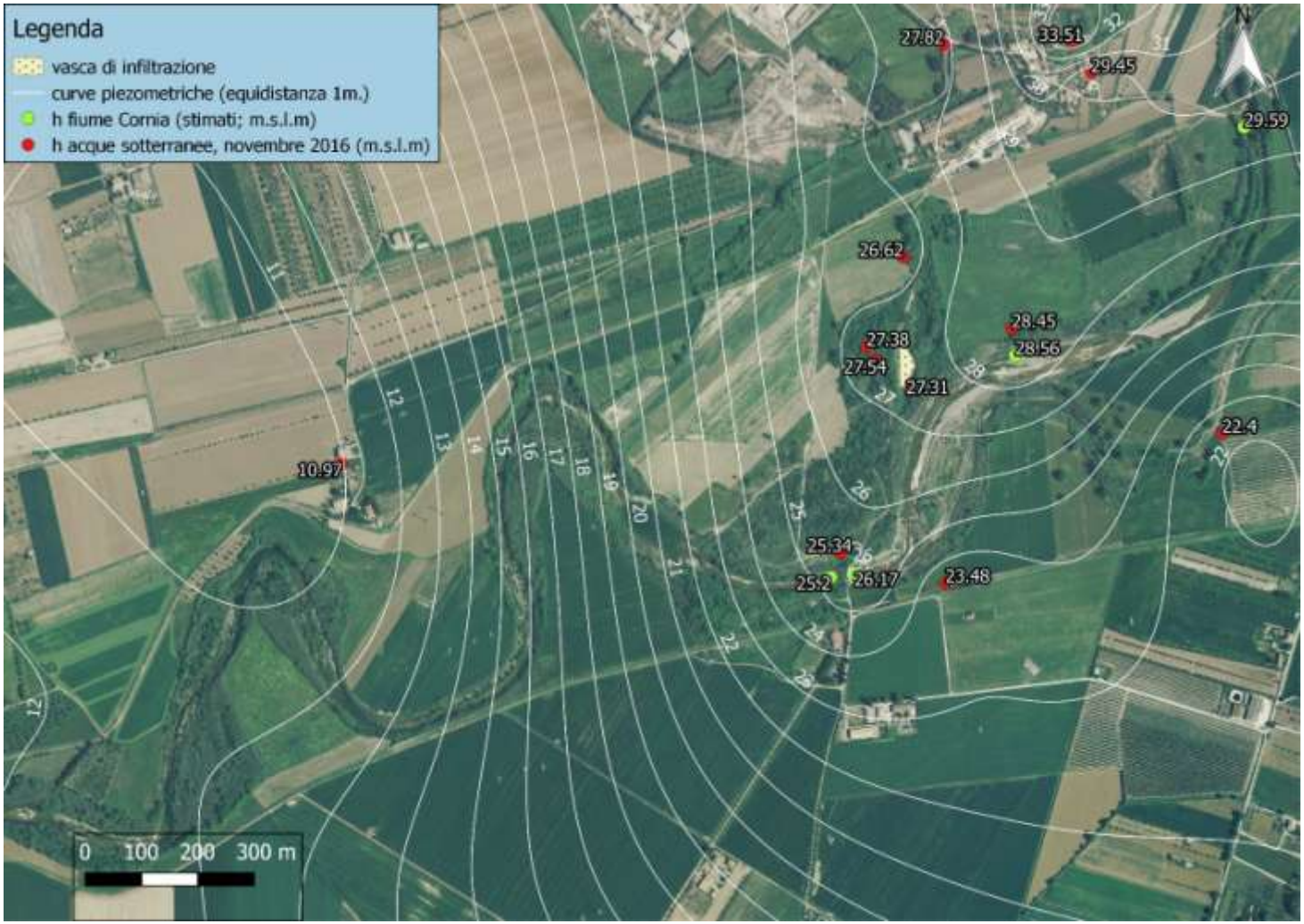


Fig. 8.3. Ricostruzione della piezometria, Novembre 2016

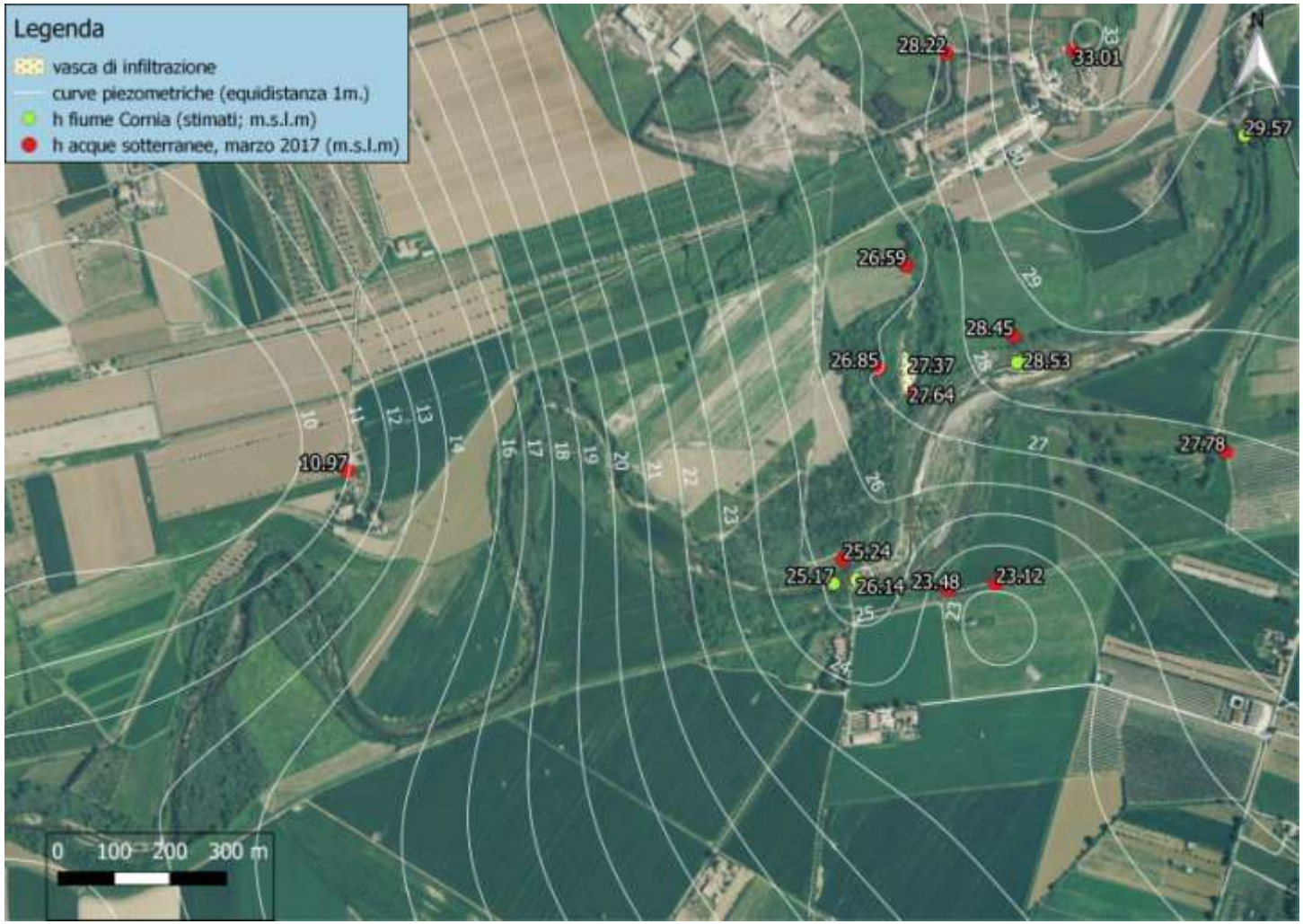


Fig. 8.4. Ricostruzione della piezometria, Marzo 2017.

Fig. 8.5. Ricostruzione della piezometria, Giugno 2017.

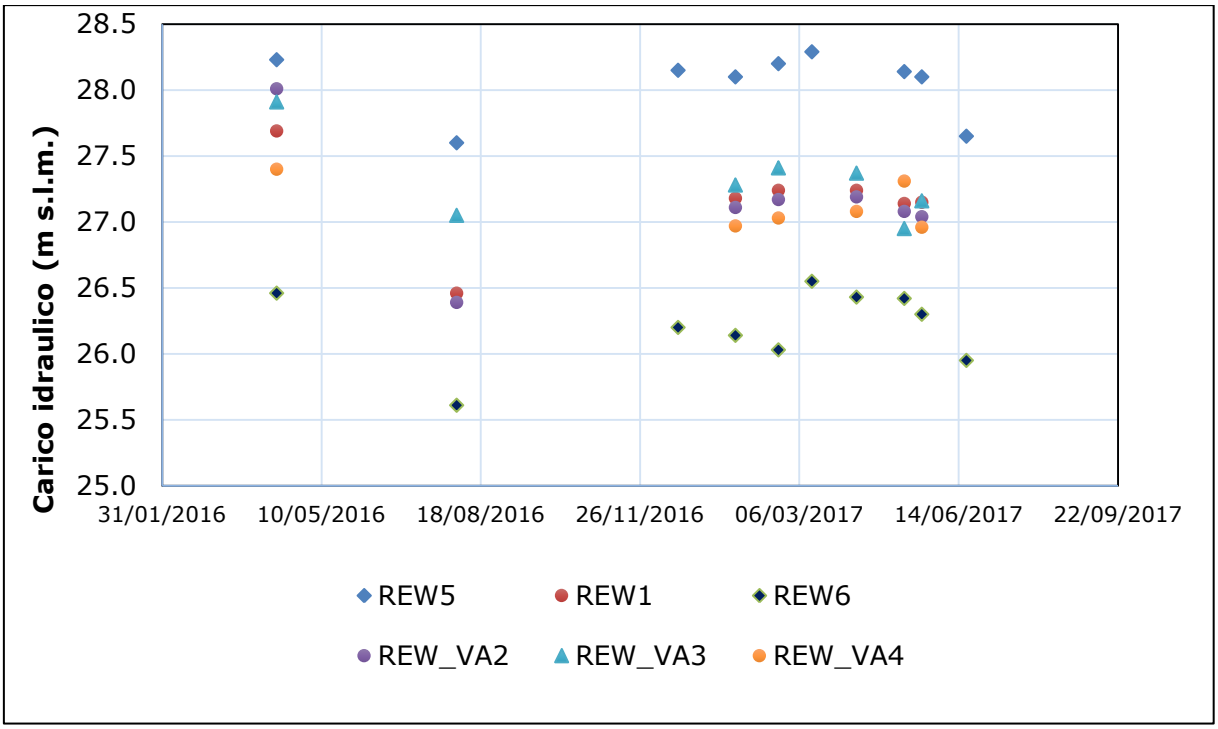


Fig. 8.6. Misure piezometriche nell'area di interesse rilevate durante il monitoraggio *ante-operam*.

9. Interazioni tra acque sotterranee ed acque superficiali

Come ampiamente riportato nel Progetto Preliminare, le relazioni tra acque superficiali ed acque sotterranee sono state oggetto di indagine negli ultimi 20 anni, per l'importanza del Fiume Cornia nella ricarica dell'acquifero.

Nell'area di studio tra Agosto 2016 e Giugno 2017 sono state condotte una serie di indagini per approfondire le conoscenze sulle relazioni acque superficiali/acque sotterranee. In merito, sono state effettuate:

- misure della quota del letto fluviale su diverse sezioni;
- misure correntometriche e osservazioni dei deflussi superficiali;

Per quanto riguarda la misura delle quote del letto fluviale, è stata condotta una campagna GPS al fine di registrare con una precisione centimetrica le quote del letto fluviale ad alcune sezioni fluviali (Fig. 9.1) e definire capisaldi nell'alveo del Fiume Cornia (Fig. 9.2). Lo strumento utilizzato è stato un Leica Viva GS15; la registrazione della posizione dei punti è stata effettuata in configurazione RTK (*real time kinematics*). La correzione del dato è stata ottenuta in tempo reale mediante modem GSM dalle informazioni ricevute dalla rete di stazioni fisse ItalPOS. Di seguito sono riportate le sezioni 01B, 02 e 03, rispettivamente a monte dell'area di sito, immediatamente a monte della vasca d'infiltrazione e la prima a valle dell'area dell'impianto di ricarica (Fig. 9.3, Fig. 9.4 e Fig. 9.5).

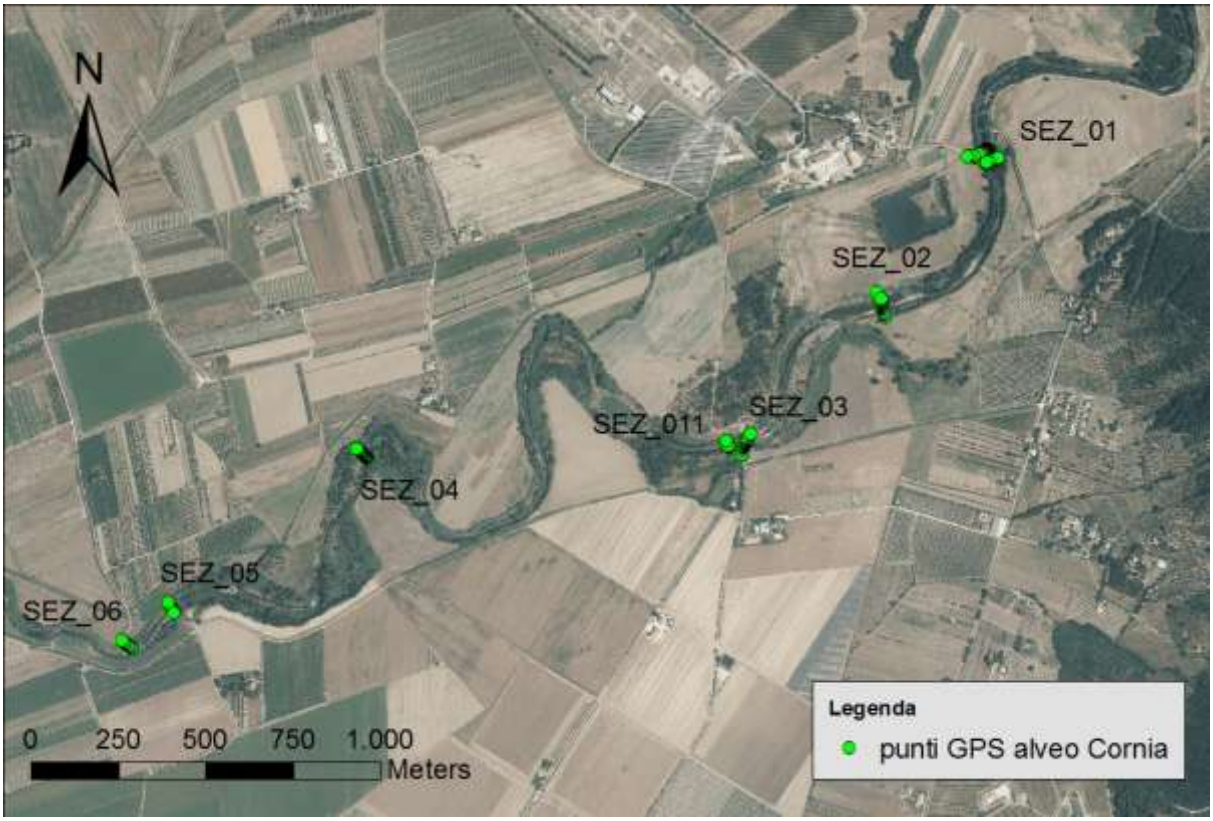


Fig. 9.1. Posizione delle sezioni rilevate con gps del Fiume Cornia. L'area del sito è compresa fra le sezioni 02 e 03.

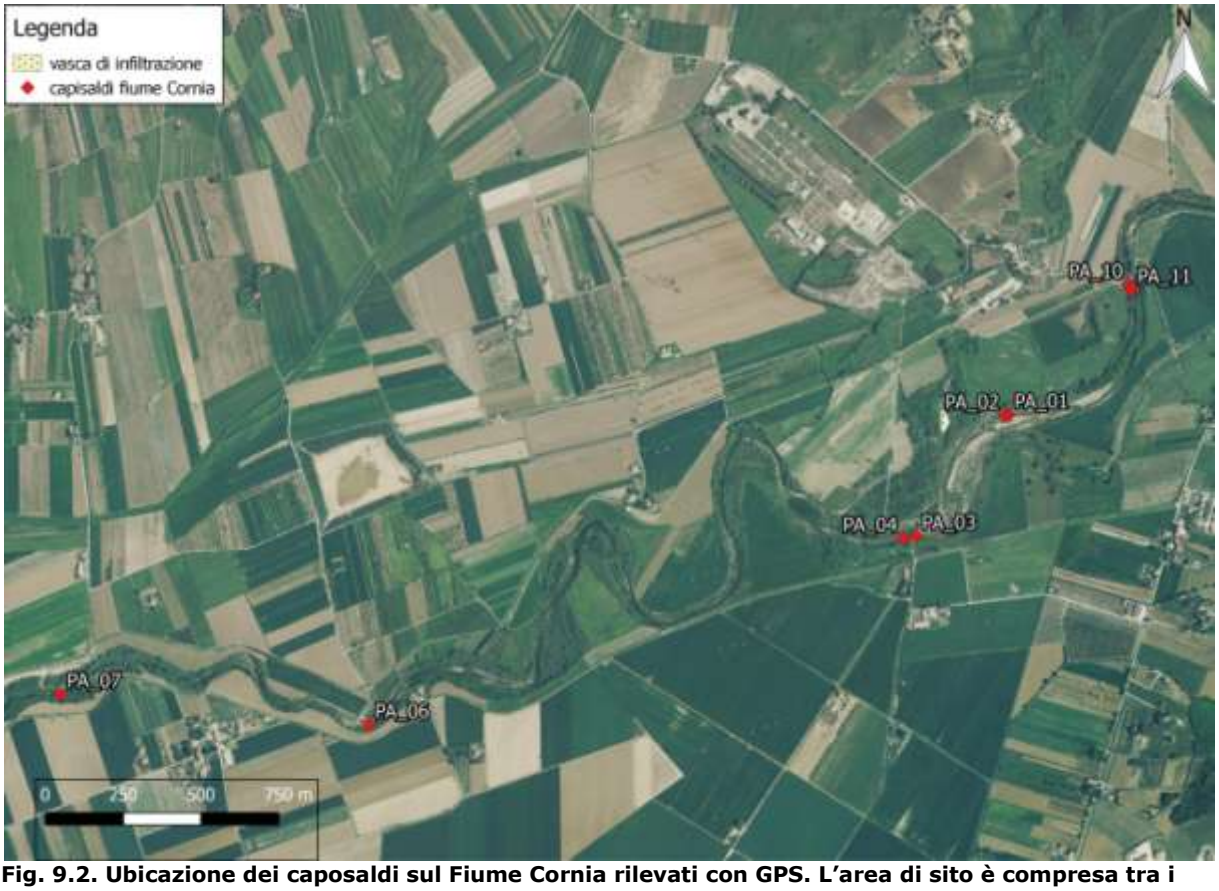


Fig. 9.2. Ubicazione dei caposaldi sul Fiume Cornia rilevati con GPS. L'area di sito è compresa tra i caposaldi PA_01 e 02 e PA_03 e 04.

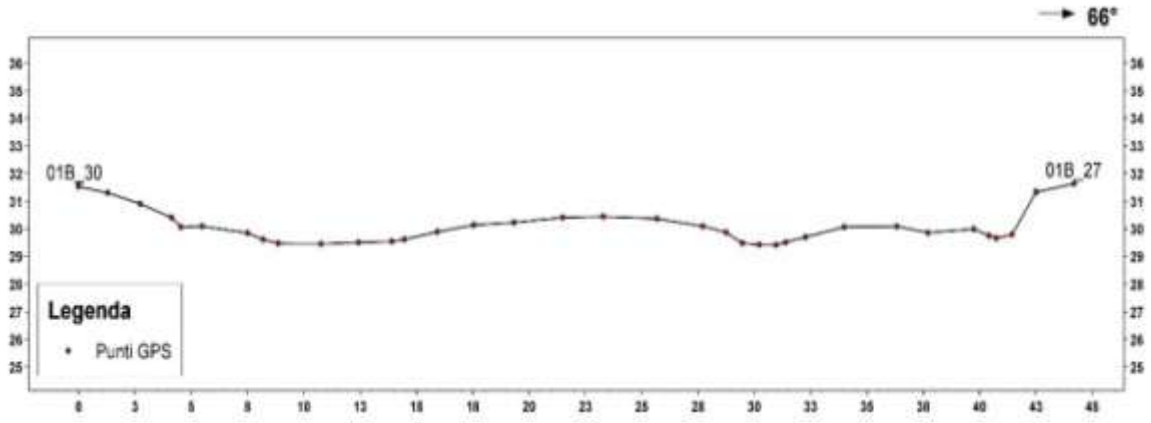


Fig. 9.3. Sezione 01B, a monte dell'area di ricarica. Subito a monte della sezione è presente una traversa sul fiume, per il passaggio di veicoli. La quota minima del letto fluviale è 29.5 m s.l.m., la media è 29.84.

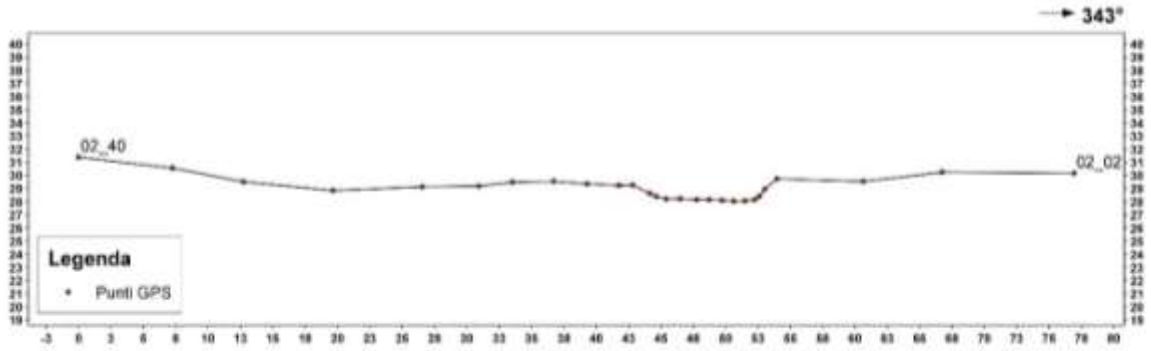


Fig. 9.4. Sezione 02, immediatamente a monte della vasca d'infiltrazione. La quota minima del letto fluviale è 28.04 m s.l.m., la media è 28.20.

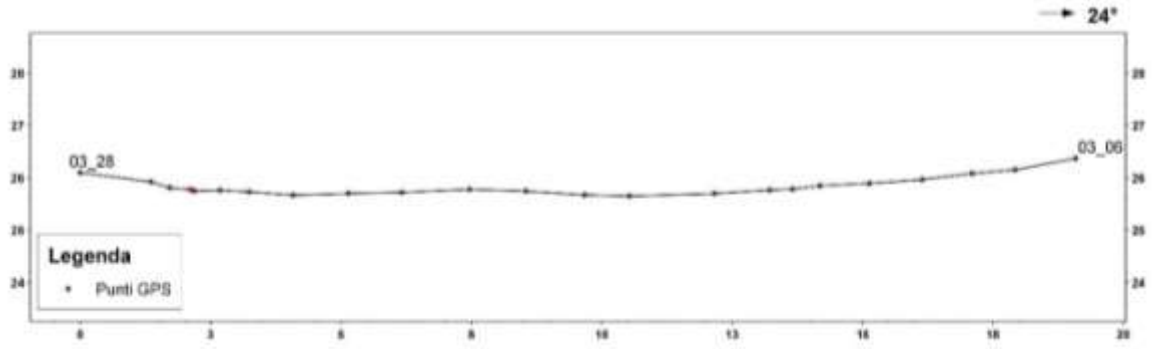


Fig. 9.5. Sezione 03, a valle della vasca d'infiltrazione. La quota minima del letto fluviale è 25.67 m s.l.m., la media è 25.77.

10. Misure correntometriche

Misure correntometriche sul Fiume Cornia sono state eseguite dalla Regione Toscana, nel periodo compreso tra marzo e maggio 2017 (Tab. 10.1), a sezioni definite presso località Ponte per Montioni, Guado di Forni, Ponte per Cafaggio, e sul torrente Milia in località Calzalunga, affluente del Cornia che si immette a monte di Guado di Forni (Fig. 10.1). In aggiunta a queste, l'unità della Scuola Superiore Sant'Anna ha effettuato osservazioni e misure correntometriche sul Fiume Cornia nel periodo compreso tra Agosto 2016 e Luglio 2017 sono state svolte determinazioni aggiuntive della corrente nel fiume in località Forni (Fig. 9.2), effettuate con correntometro acustico digitale OTT ADC®, in data 11 maggio 2017.

Le informazioni ottenute in occasione di tali indagini permettono di valutare per il tratto disperdente compreso tra il Guado di Forni e Ponte per Cafaggio, in diverse condizioni idrologiche e con portate in ingresso al Guado dei Forni variabili tra 1,17 m^3/s e 0,1 m^3/s una perdita di subalveo massima intorno a 0,16 m^3/s. Nel particolare anno idrologico 2016/2017, il periodo di magra del Fiume Cornia è anticipato ed il tratto di interesse è in condizioni di secca dal Giugno 2017 – con minimi relativi registrati già nel mese di Maggio.

In data 19 luglio 2017, durante il sopralluogo sono state osservate presso il Guado di Forni, in secca (), emergenze di acque sotterranee diffuse, che alimentavano le rimanenti porzioni umide del letto fluviale. Questo indica o l'azione di drenaggio del letto fluviale di una falda superficiale, oppure risalita di flussi profondi. I flussi osservabili erano pari a pochi cl/s. Una stima degli afflussi di falda in tale periodo basata sull'estensione dell'area umida rimanente, considerando quindi apporti nell'area sommersa, e considerando un tasso di evapotraspirazione medio lungo il tratto fluviale pari a 0.02 m/giorno, porta a valutare tale afflusso in circa 1 l/s.

Fig. 10.1. Località dove il servizio idrologico della Regione Toscana ha svolto le misure correntometriche.

Data	09/03/17	06/04/17	24/04/17
Unità di misura	Q (l/s)		
Ponte per Montioni	905	557	100
T. Milia a Calzalunga	252	8	2
Guado di Forni	1172	517	160
Ponte per Cafaggio	1060	422	0
Differenza Guado Forni – Ponte per Cafaggio	**112**	**95**	**160**

Tab. 10.1. Portate (Q) determinate dal servizio idrologico della Regione Toscana per sezioni del Fiume Cornia.

Data	3/08/16	11/05/17	22/05/17	19/06/17	19/07/17
Unità di misura	Q (l/s)				
Guado di Forni, prossimità del PA_11	10*	110	50 – 70*	5 – 15*	0
PA_01	0	nd	nd	0	0
PA_04	0	54	10-30*	0	0
PA_06	0	0	0	0	0
Differenza Guado Forni – Pa_06	**10**	**110**	**70**	**15**	**0**

Tab. 10.2. Determinazioni delle misure correntometriche del Fiume Cornia svolte in prossimità dei caposaldi PA_11 e PA_04 (*valori stimati in via speditiva).

L'analisi delle misure piezometriche, unitamente alle misure di livello, svolte nell'area del sito dimostra come il Fiume Cornia, nell'area di interesse vada a rincarare la falda. Le misure idrometriche ai caposaldi PA_10, PA_11, PA_01, PA_02, PA_03 e PA_04

sono costantemente superiori ai valori dei 6 piezometri posti nei pressi dell'impianto (Fig. 10.4).

Fig. 10.2. Tratto in secca in data 19/06/2017, a valle dell'impianto di ricarica, caposaldo PA_04.

Fig. 10.3. Tratto in secca nel periodo 19/06/2017, località Guado di Forni, caposaldo PA_11.

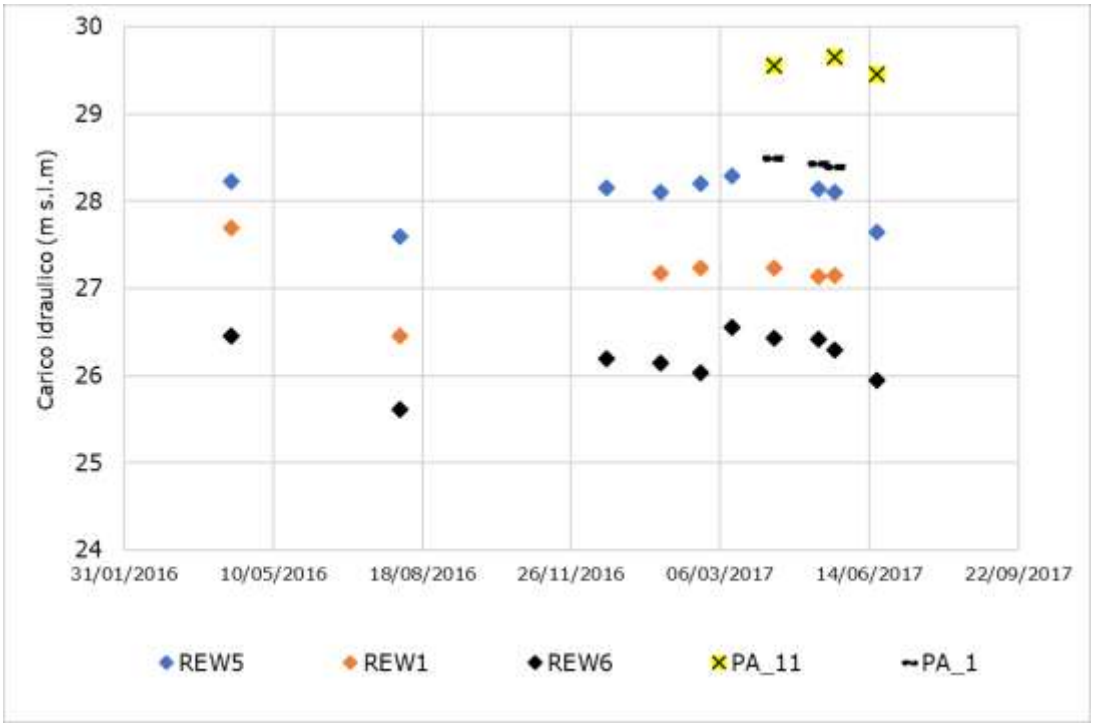


Fig. 10.4 Livelli piezometrici misurati nelle stazioni nell'area di sito (REW) e idrometrici (PA) misurati ai capisaldi dell'alveo.

11. Andamento temporale dei parametri chimici significativi: risultati dal monitoraggio *ante-operam*

Sulla base di quanto fino ad adesso esposto è stato posto in essere un sistema di monitoraggio *ante-operam* per il rilievo della qualità delle acque sotterranee in prossimità dell'area di sito. Lo scopo di tale monitoraggio è quello di definire lo stato chimico delle acque e la sua variazione nello spazio e nel tempo (a monte ed a valle dell'area di intervento) nell'area in analisi. Il sistema di monitoraggio (discreto) ha previsto il prelievo mensile di campioni di acqua sotterranea (prelevati tramite pompa a basso flusso previo spurgo e stabilizzazione dei parametri chimico-fisici di base) ad una serie di piezometri presenti nell'area prevista per l'impianto di ricarica in condizioni controllate.

Dal Dicembre 2016 sono state effettuate campagne di monitoraggio con cadenza mensile nei punti selezionati per il monitoraggio *ante-operam*, riprotati in Fig. 11.1. In particolare, i punti REW1, REW5 e REW6 sono piezometri, SU01 e SU08 sono pozzi idropotabili già impiegati da ASA. Il punto REW1 è stato monitorato solamente per la campagna riguardante Aprile 2016 e successivamente scartato. A questi si aggiunge il punto di prelievo delle acque del Fiume Cornia nel punto atteso per la derivazione delle acque superficiali, a monte del Fosso Ripopolo. Nel monitoraggio del 19 Giugno 2017 il punto REWCOR1 era asciutto. Per il campionamento delle acque superficiali, si è ricorso ad una stazione più a monte (REWCOR2), in prossimità della località Guado di Forni.

Per quanto riguarda la qualità delle acque, vengono determinati parametri e analiti riportati nelle Tabelle 3 e 4 del D.Lgs 31/2001. Da dicembre 2016 è inoltre monitorato anche il mercurio.

Fig. 11.1 Punti di monitoraggio utilizzati.

Di seguito, in questo capitolo vengono riassunti i risultati delle misure dei parametri chimico fisici, eseguiti in situ attraverso sonda multiparametrica (determinazioni riportate in Allegato 4, Tab. A4.1), e delle analisi chimiche e microbiologiche eseguite nei laboratori di ASA Spa. a partire dal 2016. Riguardo queste analisi, la metodica usata, ed i limiti di rilevabilità, sono riportati in Allegato 4, Tabelle A4.2 e A4.3. Si noti come i limiti di rilevabilità siano inferiori ai limiti di legge prescritti ai sensi della Tabella 3 del D.Lgs.30/2009, con la sola eccezione del mercurio nelle acque superficiali. A tal proposito, si ricorda che, come riportato in sezione 4.2, il monitoraggio ARPAT nell'area indichi, dal 2015, valori di mercurio sempre al di sotto di 0.03 μg/l.

Per quanto riguarda i valori di pH, le acque sotterranee mostrano valori compresi tra 7.3 e 9.5, valori estremi entrambi relativi al pozzo SUO1, mentre il pozzo SU08 ha valori compresi tra 7.7 e 8.7. Più prossimi all'area di sito, i punti di monitoraggi REW5 e REW6 presentano valori compresi tra 7.6 e 8.3. Le acque superficiali del Fiume Cornia mostrano valori tra 8 e 9.1. (Allegato 4, Tab. A4.1).

L'andamento nel tempo delle caratteristiche chimiche delle acque può essere agevolato per mezzo della rappresentazione grafica tramite diagrammi, utile per dare una maggiore evidenza di tali caratteristiche e inoltre per consentire un confronto visivo tra le acque e i loro principali ioni costituenti. I risultati delle analisi e degli elementi maggiori vengono di seguito presentati nel diagramma di Piper (Fig. 11.2) e di Schoeller (Fig. 11.3). I campioni relativi ai punti di monitoraggio delle acque sotterranee REW5, REW6, SU08 e delle acque superficiali del Fiume Cornia, REW COR1, appartengono alla facies Bicarbonato-Calcica. Si osservano solamente limitate variazioni rispetto ai trend principali per il campione REW6 (Aprile 2016) e REW5 (Aprile 2016) che evidenziano minori tenuti di cloruri e solfati. Diversamente il campione SUO1 nei mesi di dicembre 2016, gennaio, febbraio, marzo e aprile 2017, anche se ricadente nella medesima facies geochimica bicarbonato-calcica, si trova spostato al confine con la facies geochimica bicarbonato-alcalina. Questo effetto potrebbe derivare da mescolamento con acque di diversa origine. Infatti se si osserva il triangolo in basso a destra che riporta le caratteristiche principali della distribuzione di catoni e anioni, si può notare come questo campione non abbia dominanza chimica. Il campione SU01 relativo a maggio 2017 e Giugno 2017 ricade invece nella facies solfato calcica.

Il diagramma di Schoeller permette invece di evidenziare sia anomalie del singolo punto di campionamento rispetto all'andamento tipico dell'area che la congruenza tra campioni del medesimo tipo chimico (Fig. 11.3). Dal grafico si può notare come per tutti i punti di campionamento, la pendenza delle rette che unisce i punti rappresentativi degli ioni sia sostanzialmente la stessa e quindi che il rapporto fra questi sia uguale, seppur con piccole variazioni come per il campione SU08. Per quanto riguarda invece il campione SU01, questo mostra segmenti a pendenza diversa e invertita indicando quindi che le acque hanno caratteristiche idrochimiche in parte differenti, con un maggior contenuto in

sodio e cloro, in accordo con quanto presentato nel diagramma di Piper. Anche in questo caso i campioni SU01 di maggio e giugno 2017 sembrano possedere delle caratteristiche idrochimiche differenti, mostrando un valore molto basso in solfati e anioni bicarbonati, venendosi a trovare nella facies solfato calcica.

Per quanto riguarda la conducibilità elettrica tutti i campioni provenienti sia dalle acque superficiali del Fiume Cornia sia dalle acque sotterranee hanno evidenziato una conducibilità elettrica variabile tra 596 µs/cm e 700 µs/cm. Solamente il campione SU01 mostra dei valori di conducibilità elettrica più elevati, con un valore medio di 831 µs/cm e valori massimi di 941 µs/cm, in accordo con i risultati mostrati nei diagrammi precedenti.

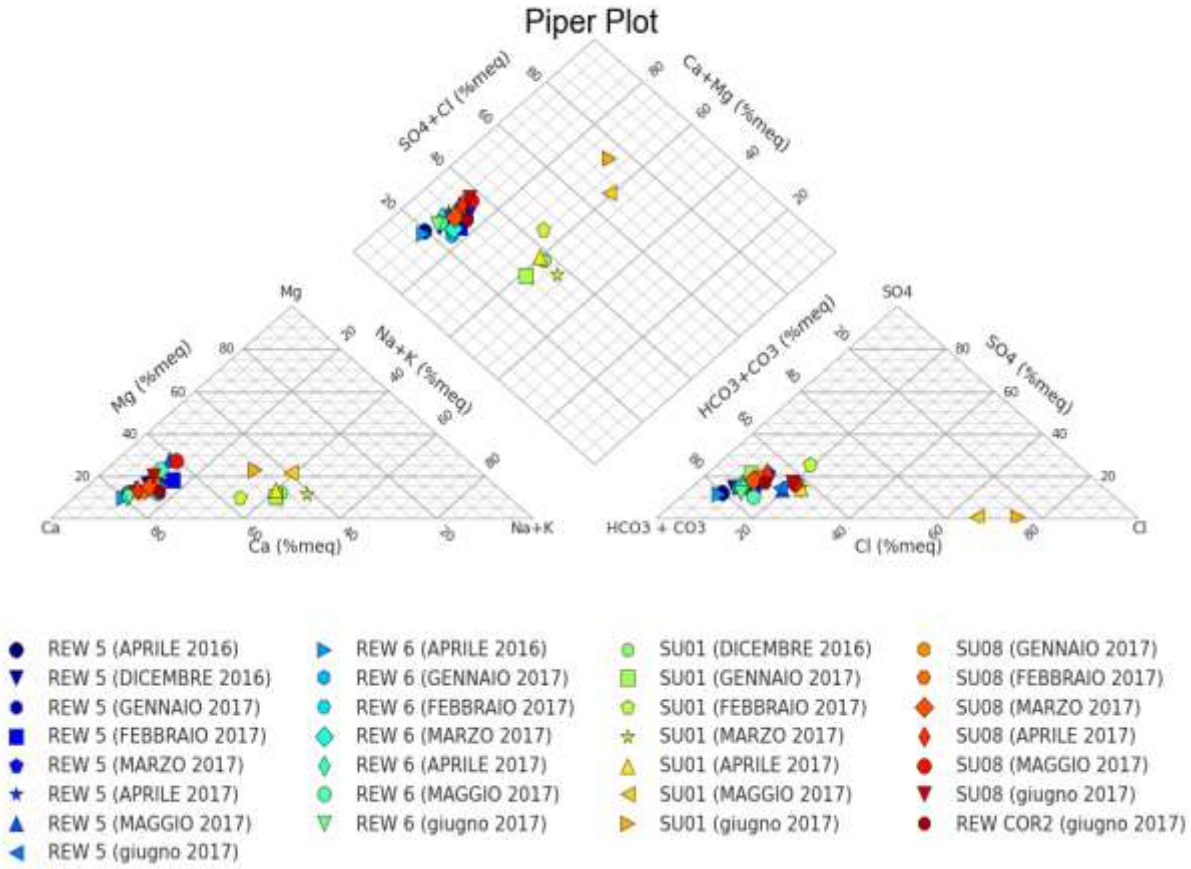


Fig. 11.2. Diagramma Piper delle analisi del monitoraggio.

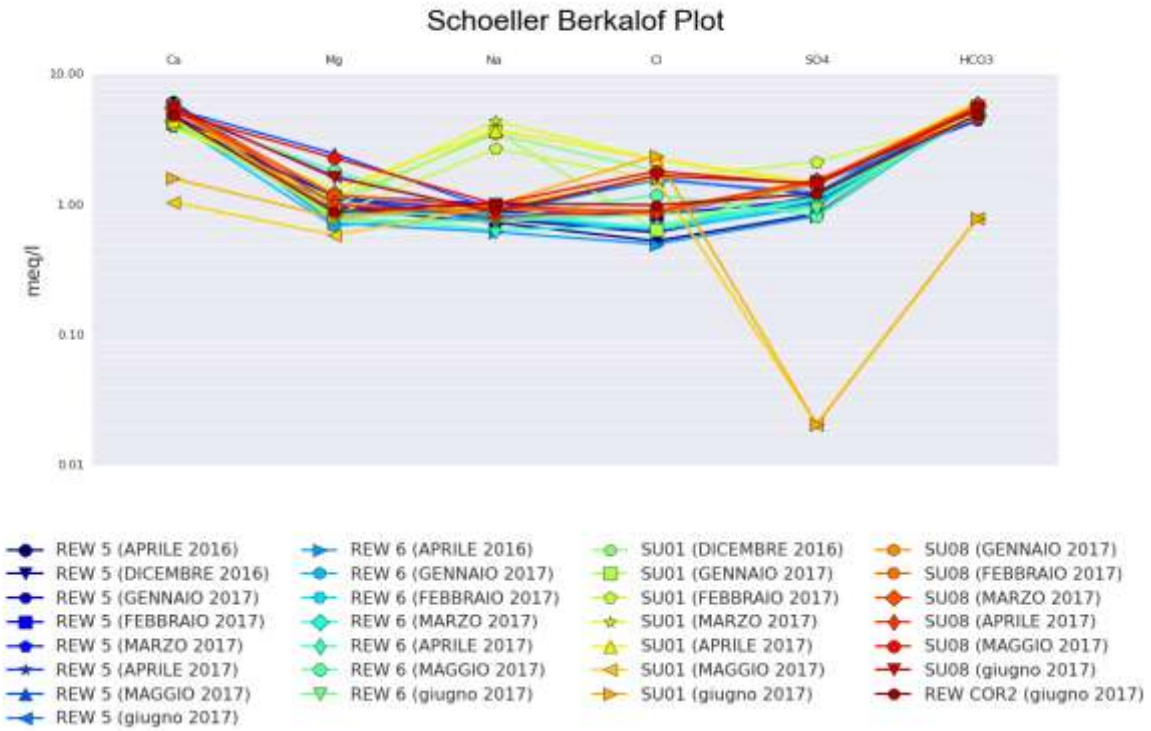


Fig. 11.3. Diagramma Schoeller delle analisi del monitoraggio.

Per quanto riguarda i principali parametri chimici analizzati, di seguito vengono riportati gli andamenti temporali relativi i 5 punti monitorati.

Per tutti i punti, il monitoraggio ha mostrato concentrazioni di mercurio e ione ammonio al di sotto del limite di rilevabilità della metodica utilizzata. Si ricorda come i limiti di rilevabilità delle metodiche usate siano inferiori ai limiti di legge prescritti ai sensi della Tabella 3 del D.Lgs 30/2009 (Tab. 11.1). Anche litio e fosfato sono risultati sempre sotto i limiti di rilevabilità.

	METODICA	**LIMITE RILEVABILITA'**	**LIMITE NORMATIVO**
Hg	ISS DBB 013 rev.00	<0,2 microg/l	1 microg/l
NH_4^+	ISS BHE 019 rev.00	<0,05 mg/l	0,5 mg/l
PO_4^{-3}	IRSA - CNR N° 4110 A1	<100,0 microg/l	-
Li	ISS CBB 038 rev.00	<0,5 mg/l	-

Tab. 11.1. Confronto fra limite di rilevabilità della metodica usata, e eventuali limiti normativi ai sensi del D.Lgs 30/2009 per mercurio, ione ammonio, fosfato e litio.

I valori di magnesio, sodio e calcio sono riportati nel grafico in Fig. 11.4. In tutti i casi, i valori di calcio misurati sono risultati compresi tra circa 80 e 125 mg/l. I punti hanno mostrato valori simili anche per il magnesio, compreso tra circa 9 e 30 mg/l, mentre il

pozzo SU01 ha mostrato solitamente valori di sodio tra i 60 e i 100 mg/l, rispetto ai valori determinati per gli altri punti, compresi tra 14 e 30 mg/l. Eccezione è stato il monitoraggio in data 22 Maggio 2017, che ha presentato valori di Na per il pozzo SU01 di 23 mg/l, in linea con gli altri punti.

Per tutti i punti, i valori determinati di solfati, cloruri e fluoruri (Fig. 11.6, Fig. 11.7, Fig. 11.8) si sono mantenuti ben al di sotto dei valori di soglia del D.Lgs 30/2009 durante tutto il periodo del monitoraggio *ante-operam*. Nel monitoraggio del 22 Maggio 2017, è stato osservato nel pozzo SU01 un valore molto basso, di 1 mg/l, di solfato.

Il boro è un elemento che è naturalmente presente nelle acque Val di Cornia, anche in concentrazioni superiori ai limiti normativi di 1 mg/l. L'area del sito è stata scelta perché in quest'area le acque superficiali sono caratterizzate da concentrazioni inferiori, come confermato dal monitoraggio, che ha mostrato concentrazioni di boro nelle acque superficiali comprese tra 0.68 e 0.84 mg/l (Fig. 11.9). I punti REW 5, 6 e SU08 hanno sempre mostrato valori al di sotto di 1 mg/l, compresi tra 0.5 e 0.75 mg/l. Al contrario, per il punto di monitoraggio SU01 si sono rilevati valori più volte superiori al limite normativo, fino ad un massimo riscontrato di 2,20 mg/L. Ai fini del DM 100/2016, è il corpo idrico donatore chiamato a rispettare i limiti normativi del D.Lgs. 30/2009.

Riguardo l'arsenico, le analisi hanno evidenziato che, per i punti REWCOR1, REW5, SU01 e SU08, questo è presente in quantità variabili ma sotto i limiti previsti dalla legge (10 µg/l) (Fig. 11.10). Fa eccezione il punto REW6, dove i valori riscontrati sono maggiori, oscillando tra 8 e 12 µg/l, tranne nelle misure di gennaio e febbraio 2017. In queste due date sono presenti due picchi del valore di arsenico, da attribuirsi a procedure di campionamento eseguite per spurgo del piezometro per mezzo di bailer (causa rottura pompa adibita allo spurgo). Tale procedura non ha permesso lo spurgo del punto campionato in maniera adeguata. I campioni prelevati, presentavano colorazione arancio e aspetto diverso da quello dei campioni prelevati nell'area. Si ritiene pertanto che non siano quindi rappresentativi dell'acqua in circolazione attiva nell'acquifero, ma di quella stagnante nel piezometro. Negli stessi campioni si sono rilevati anche valori anomali di ferro, superiori ai valori di 1 mg/l (Fig. 11.11). Va ricordato che, ai fini del DM 100/2016, è il corpo idrico donatore a dover rispettare i valori di soglia normativi. Il monitoraggio delle acque superficiali svolto nel punto REWCOR1 conferma come l'acqua di ricarica rispetti sempre il limite di 10 µg/l.

Per quanto riguarda lo stronzio, questo ha mostrato, per tutti i punti monitorati, valori inferiori al limite normativo, con concentrazioni comprese tra 0,40 e 0,70 mg/l (Fig. 11.12). Anche l'alluminio e il manganese in quattro dei cinque punti campionati non mostrano risultati preoccupanti; gli unici valori più elevati vengono misurati nel campione REW6 e correlabili con lo stesso processo che riguarda l'arsenico (Fig. 11.13. e Fig. 11.14).

Lo ione nitrato ha mostrato complessivamente valori compresi tra 1 mg/l e 10 mg/l e solamente nel campione SU01 relativo a febbraio 2017 è stato determinato ad un valore di 18 mg/l (Fig. 11.15), comunque nettamente inferiore al valore soglia di 50 mg/l.

Le analisi dei parametri microbiologici su *E.coli,* Batteri coliform a 37°i, , *Clostridium perfringens*, *Pseudomonas aeruginosa,* Conteggio colonie a 22 C° e a 37C°, hanno evidenziato spesso valori più elevati nel fiume e più bassi nelle acque sotterranee, come atteso (Fig. 11.16, Fig. 11.17, Fig. 11.18, Fig. 11.19). Unico eccezione si è riscontrata per i Batteri coliformi, presenti in alcuni casi in egual misura nelle acque superficiali come nei punti SU01 (maggio 2017) e REW5 (febbraio 2017) (Fig. 11.17). Per *C. perfringens*, le acque superficiali hanno presentato i valori maggiori , con l'unica eccezione della determinazione di febbraio 2017, dove i valori maggiori si sono riscontrati nei piezometri REW5 e REW6 (Fig. 11.18).

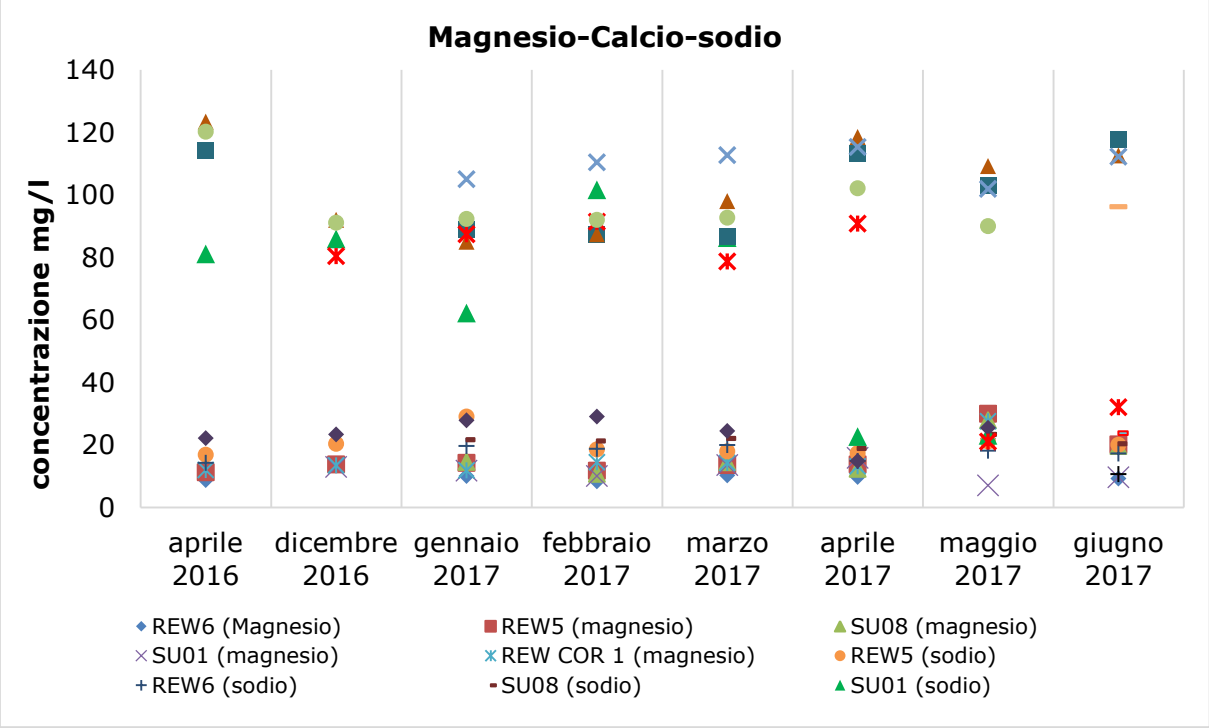


Fig. 11.4. Valori delle concentrazioni monitorate per gli analiti magnesio, sodio e calcio.

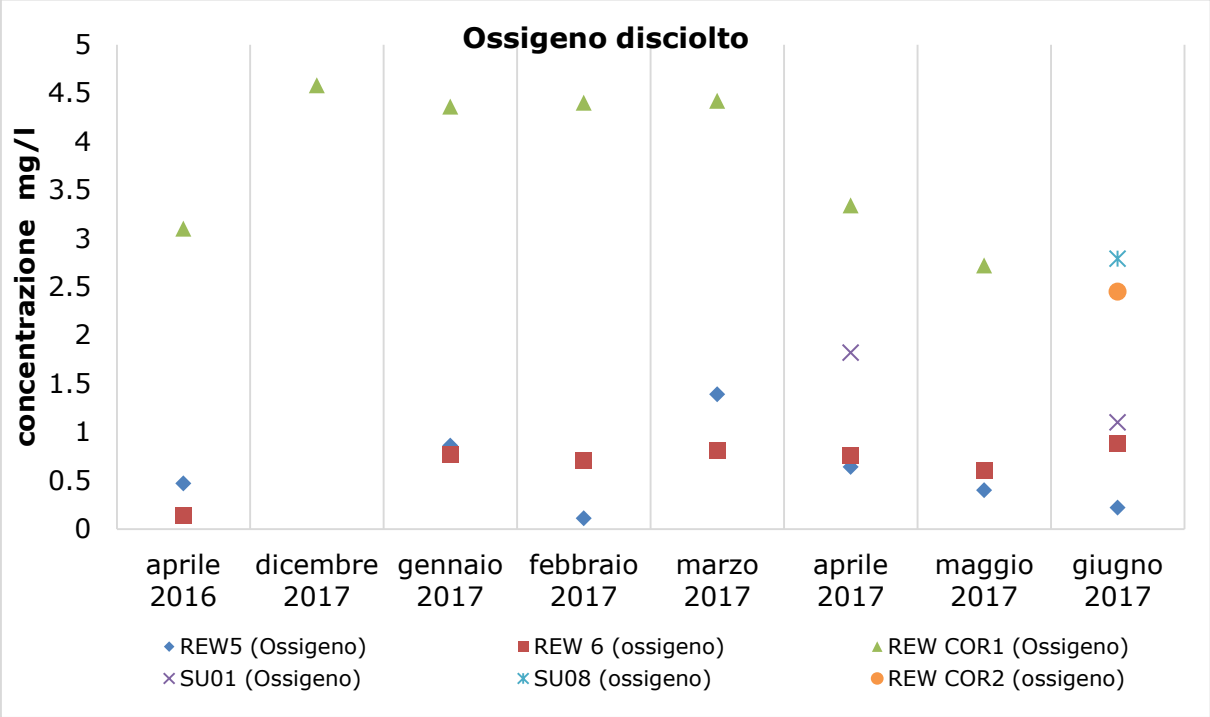


Fig. 11.5. Valori delle concentrazioni monitorate per l'ossigeno disciolto.

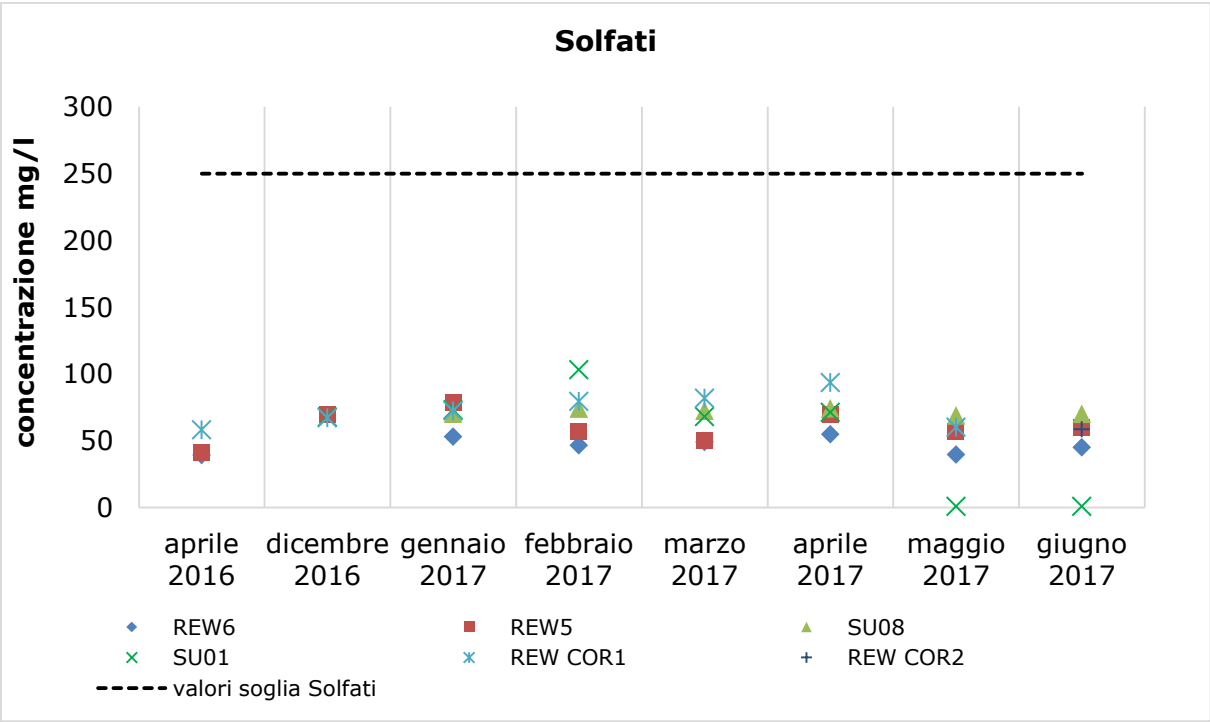


Fig. 11.6. Valori delle concentrazioni monitorate per i solfati .

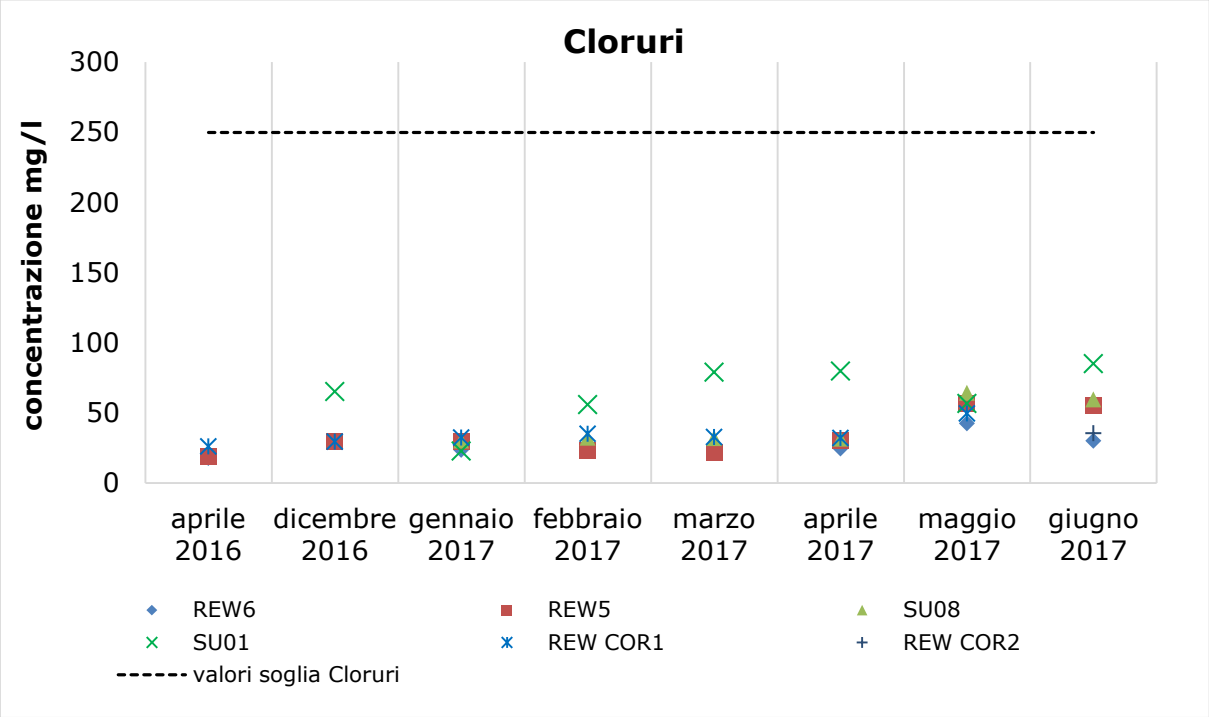


Fig. 11.7. Valori delle concentrazioni monitorate per i cloruri.

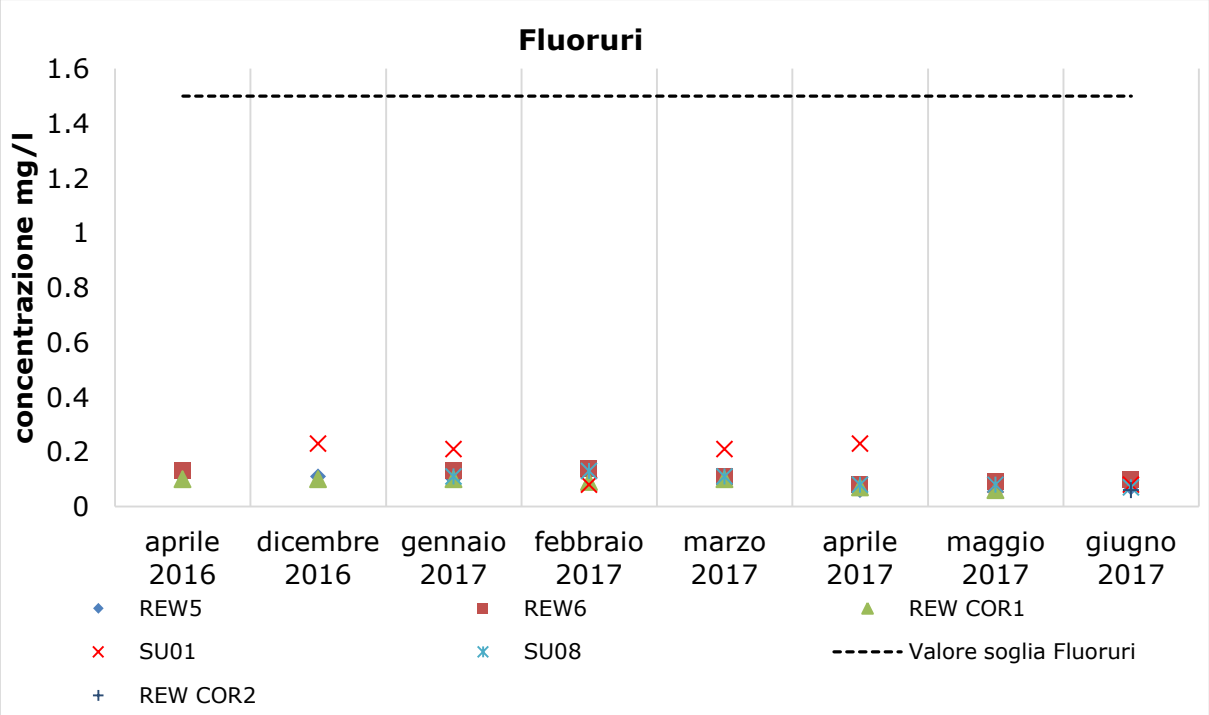


Fig. 11.8. Valori delle concentrazioni monitorate per i fluoruri.

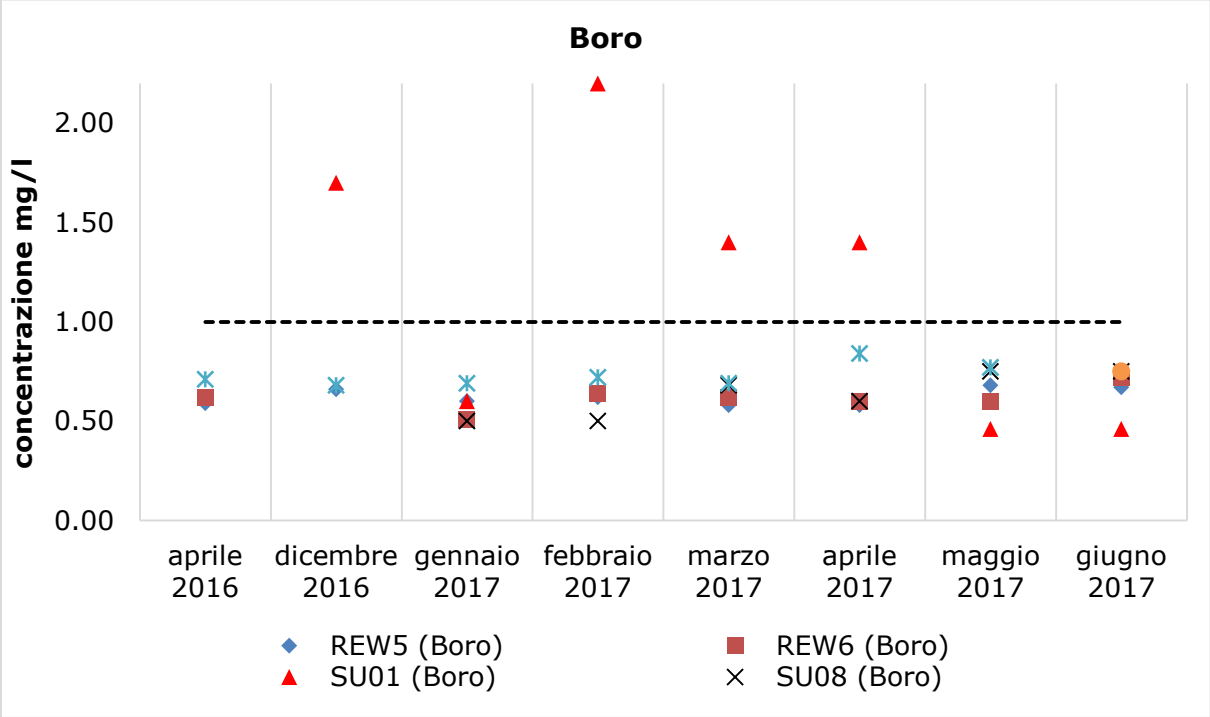


Fig. 11.9. Valori delle concentrazioni monitorate per il boro.

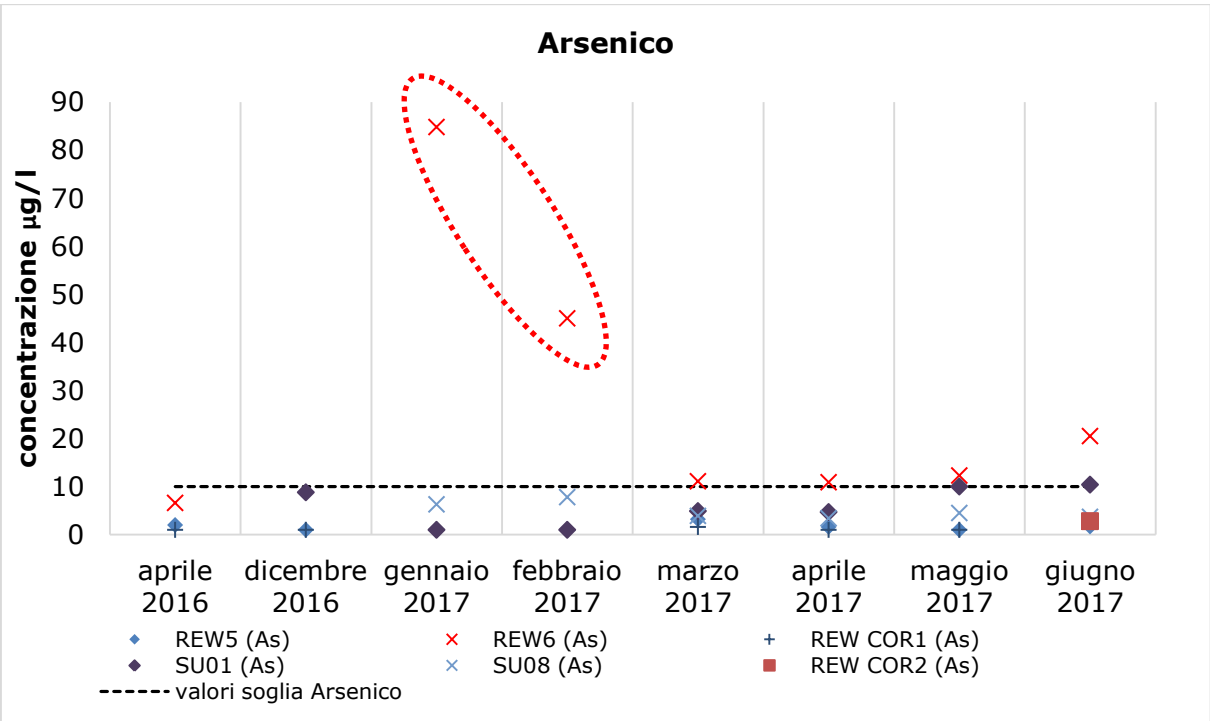


Fig. 11.10. Valori delle concentrazioni monitorate per l'arsenico. Durante le prove svolte durante gennaio e febbraio 2017 non è stato necessario utilizzare il bailer per lo spurgo dei piezometri REW 5 e 6, a causa della rottura della pompa. I risultati non devono quindi essere considerati rappresentativi dell'acqua in circolazione attiva nell'acquifero, ma di quella presente nel foro.

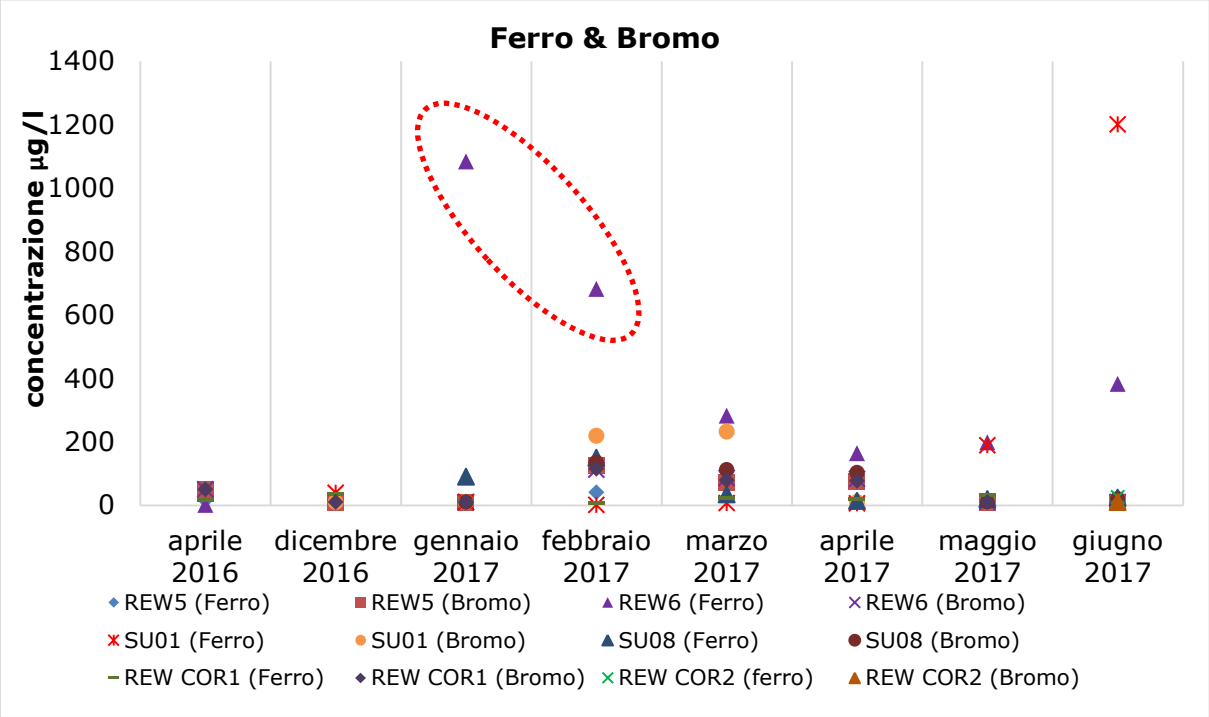


Fig. 11.11. Valori delle concentrazioni monitorate per gli analiti ferro e bromo. Si osservano il picco di concentrazione del ferro nel REW6 durante gennaio e febbraio 2017, quando non è stato possibile usare la pompa per spurgare il piezometro.

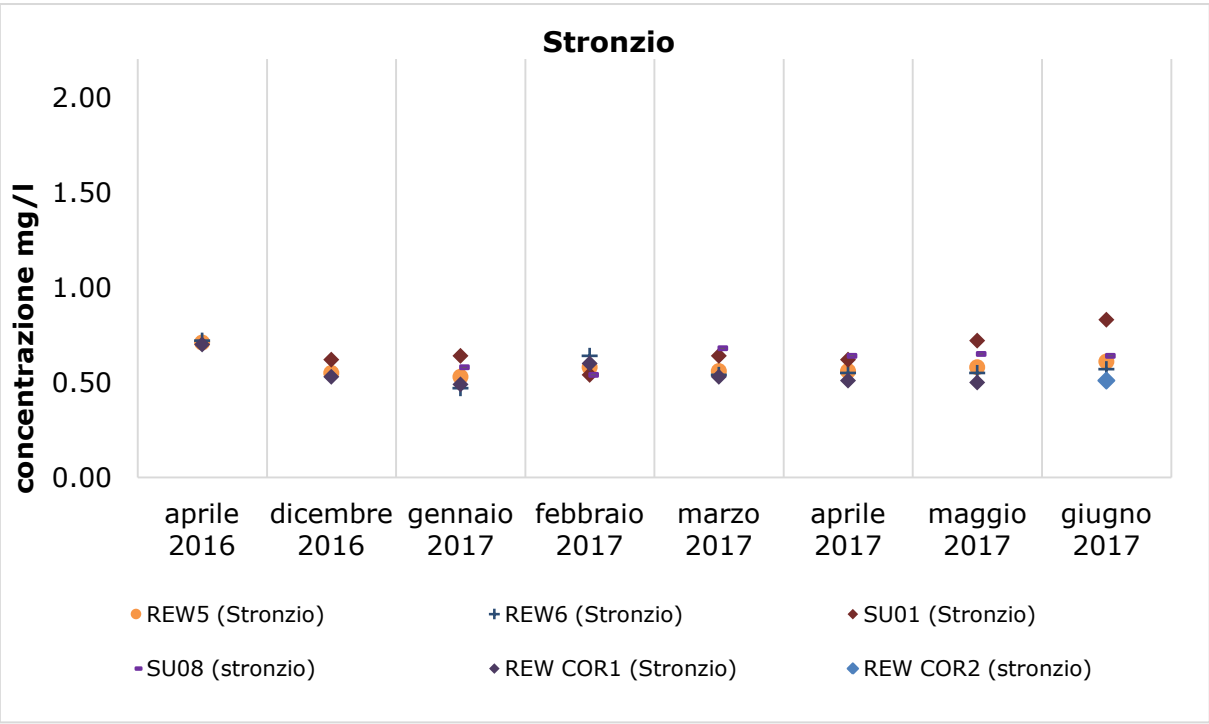


Fig. 11.12. Valori delle concentrazioni monitorate per lo stronzio.

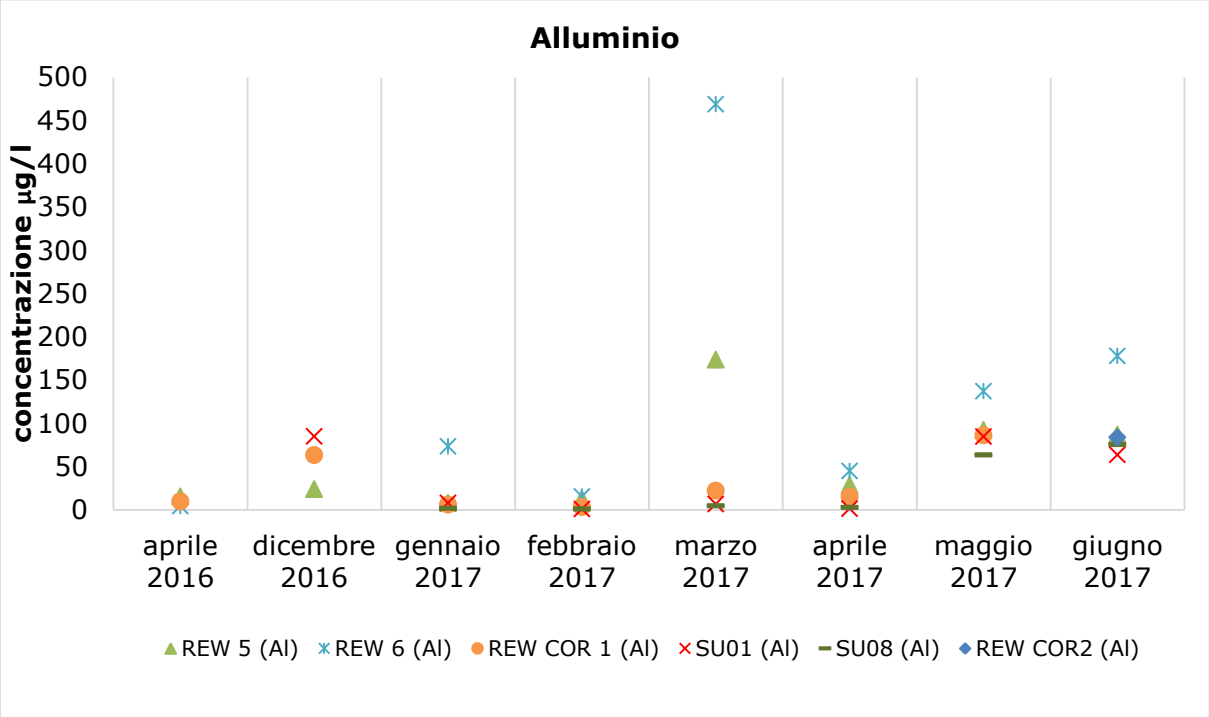


Fig. 11.13. Valori delle concentrazioni monitorate per l'alluminio.

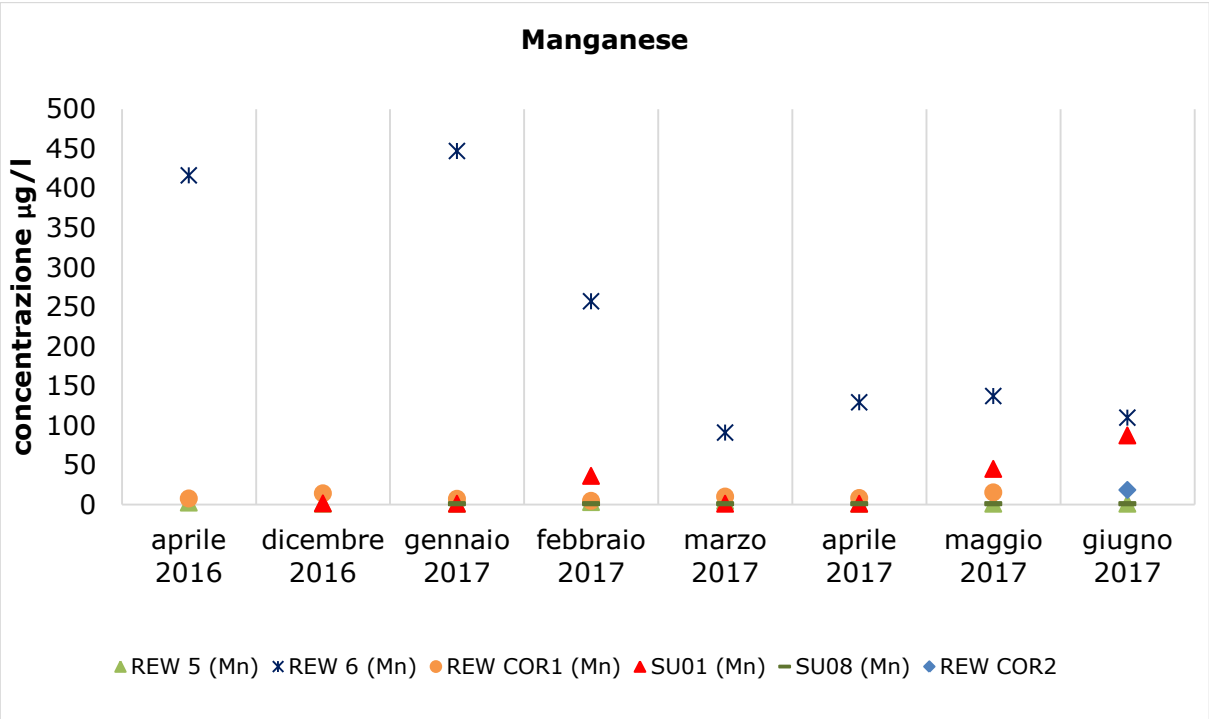


Fig. 11.14. Valori delle concentrazioni monitorate per il manganese.

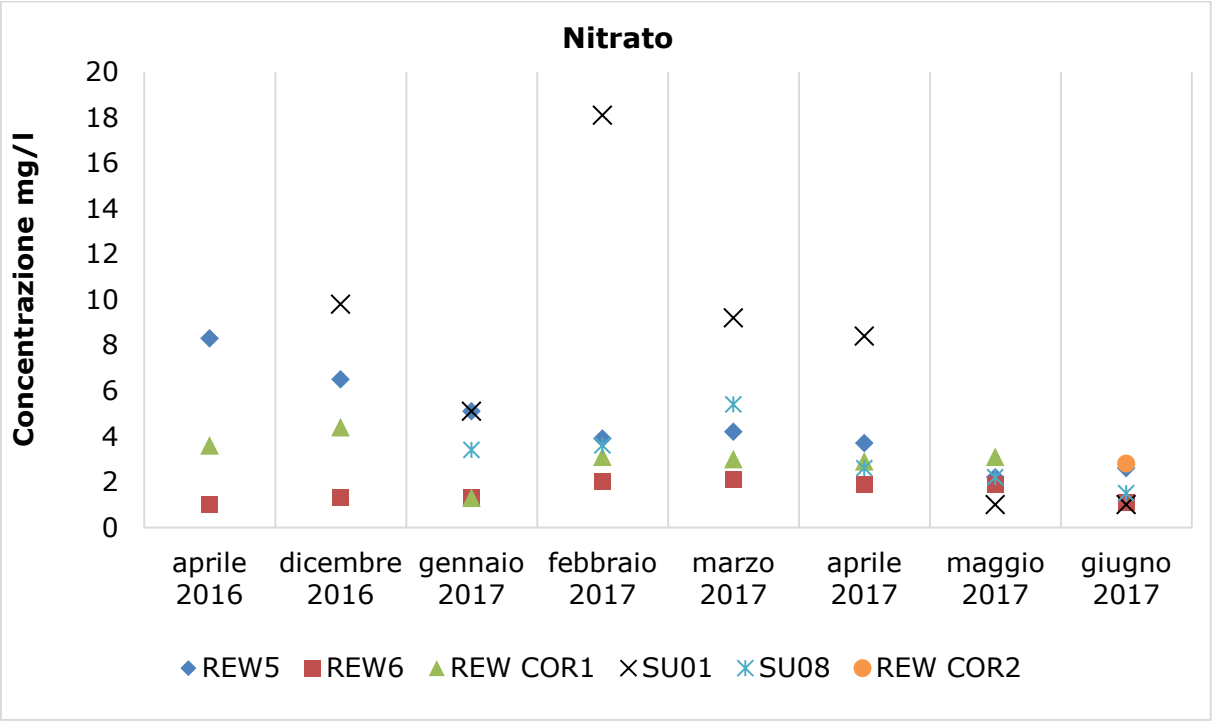


Fig. 11.15. Valori delle concentrazioni monitorate per il nitrato.

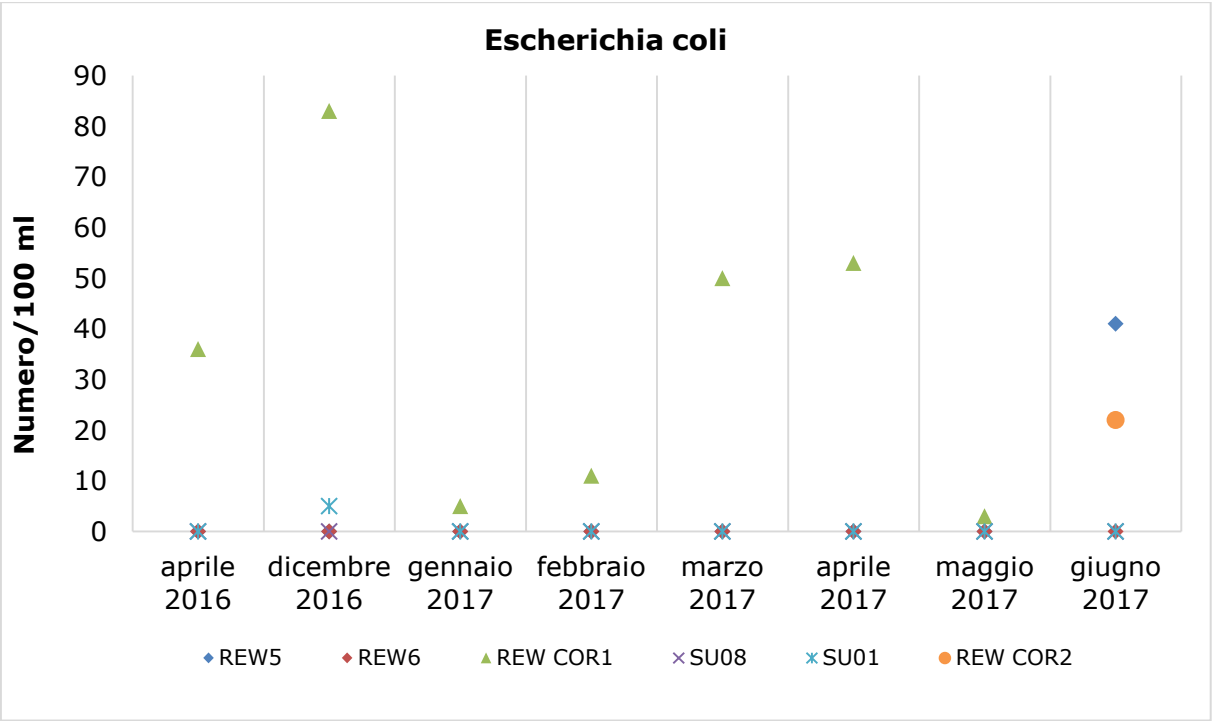


Fig. 11.16. Valori delle unità formanti colonie monitorate per *E. coli.*

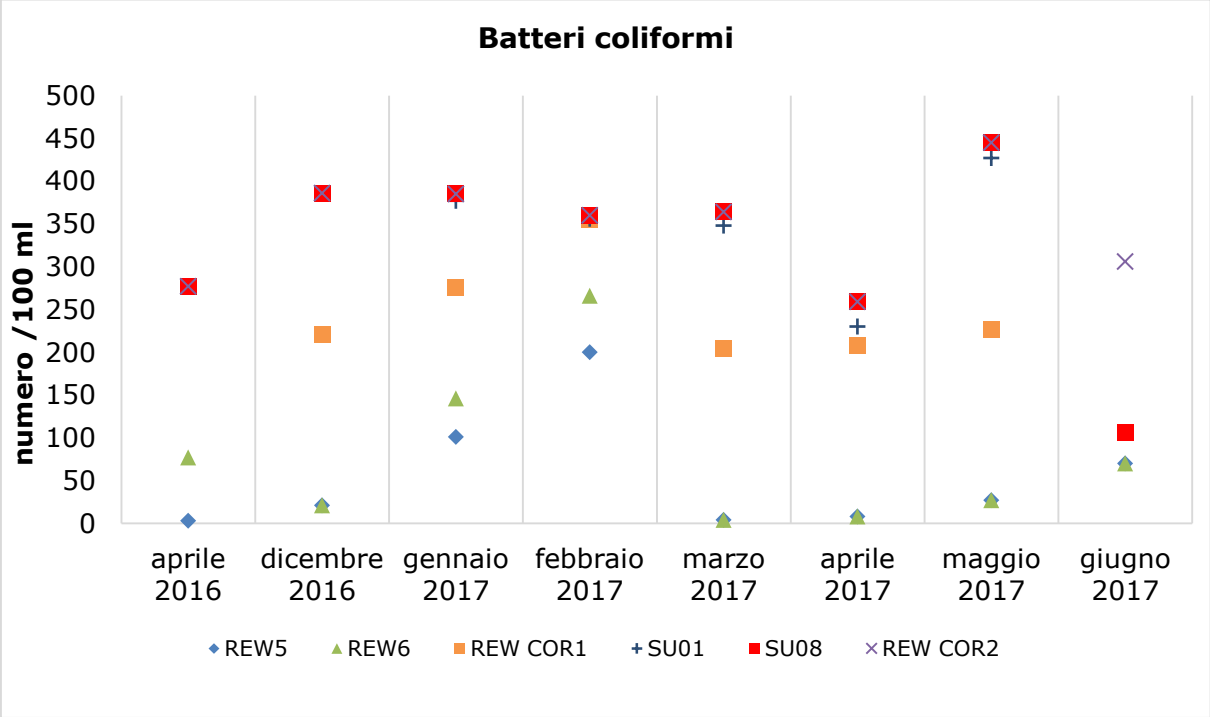


Fig. 11.17. Valori delle unità formanti colonie monitorate per Batteri coliformi.

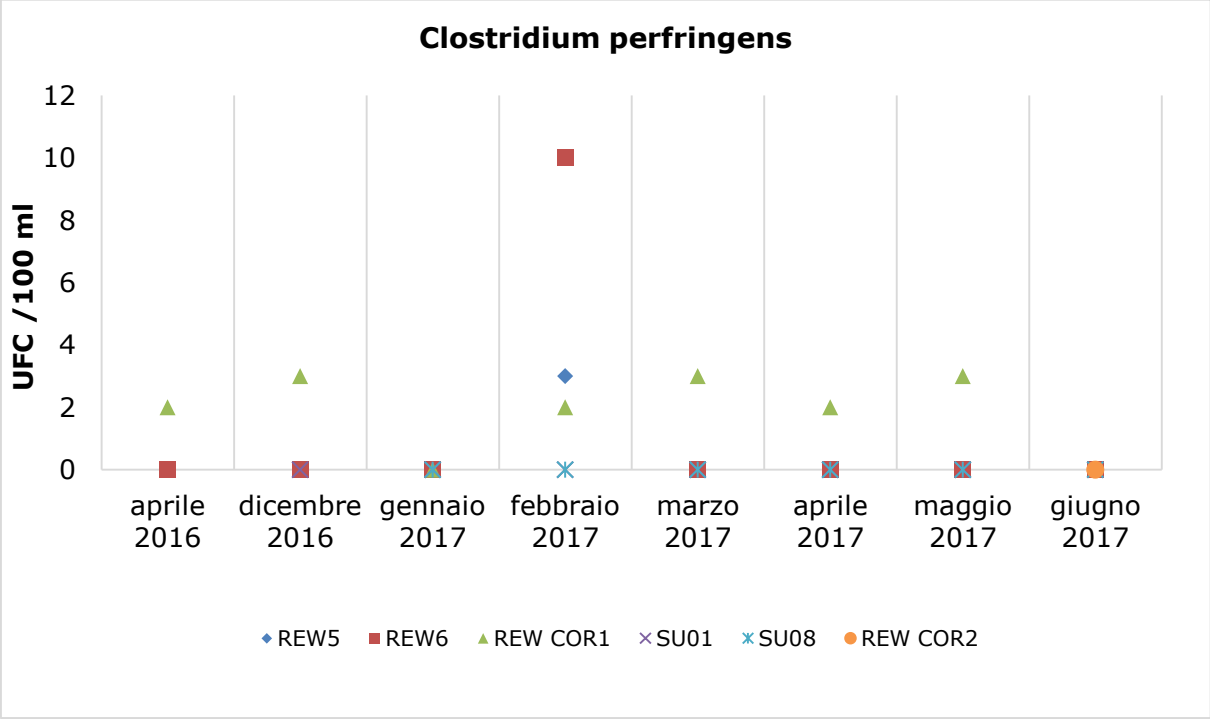


Fig. 11.18. Valori delle unità formanti colonie monitorate per *C. perfringens*.

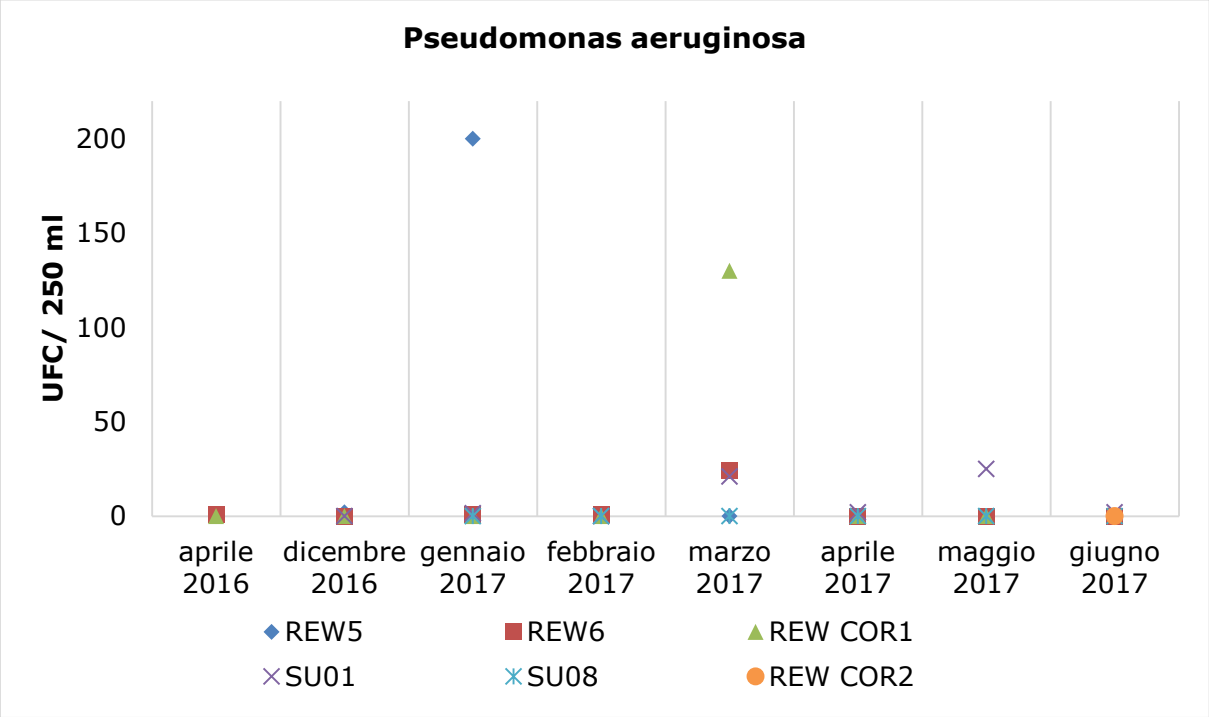


Fig. 11.19. Valori delle unità formanti colonie monitorate per *P. aeruginosa.*

12. Modellazione degli effetti della ricarica

L'impianto pilota di ricarica avrà l'effetto di innalzare il livello di falda nell'area dell'impianto e nelle aree contermini. Tale innalzamento è stato valutato per mezzo di un modello numerico preliminare, implementato con il codice MODFLOW-2005 (sviluppato da USGS) per mezzo dell'interfaccia grafica FREEWAT (www.freewat.eu). Il modello in questione è sviluppato in transitorio su 12 *Stress Period* ed è calibrato nell'area di interesse nel periodo 1 Aprile 2016 – 19 Giugno 2017. In tale modello, viene simulata (con riferimento ad un ipotetico anno idrologico attribuito per le condizioni di calibrazione alle informazioni disponibili per il corrente anno idrologico 2016/2017):

- la ricarica di 20 l/s nel periodo nel periodo 1 Dicembre 2016 – 11 Maggio 2017 (circa 280000 m^3 di acqua ricaricati);
- la ricarica di 50 l/s nel periodo nel periodo 1 Dicembre 2016 – 11 Maggio 2017 (circa 700000 m^3 di acqua ricaricati).

Di seguito sono riportate una serie di Figure che presentano gli innalzamenti attesi nella pianura della Val di Cornia, per i due valori (20 l/s e 50 l/s) dopo due mesi dall'inizio della ricarica (Fig. 12.1 e 12.2) ed al termine del periodo di ricarica (Fig. 12.3 e 12.4). Le Fig. 12.5 e 12.6 permettono di valutare l'area in cui si avrebbe un innalzamento atteso pari almeno ad 1 cm nel contesto dell'intera pianura.

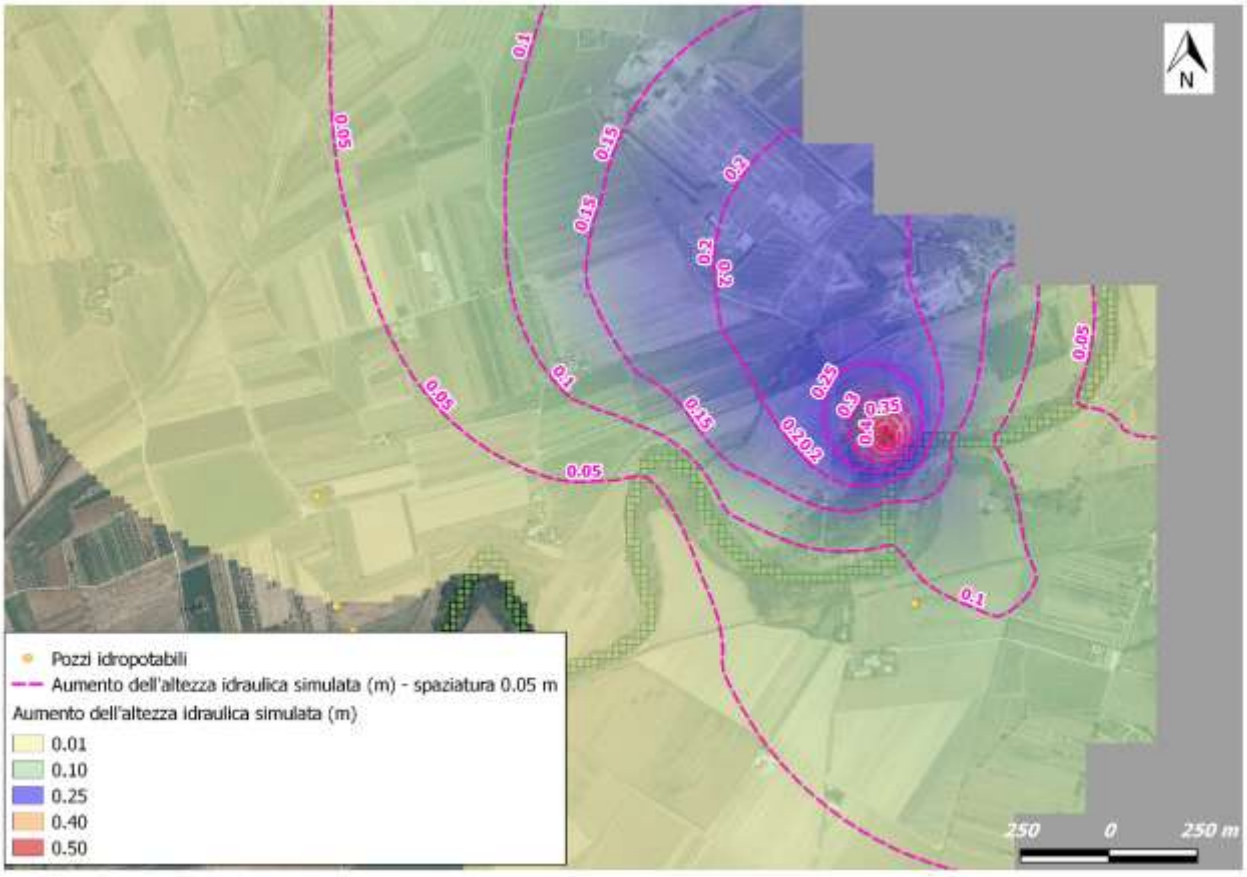


Fig. 12.1. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 25/01/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 20 l/s.

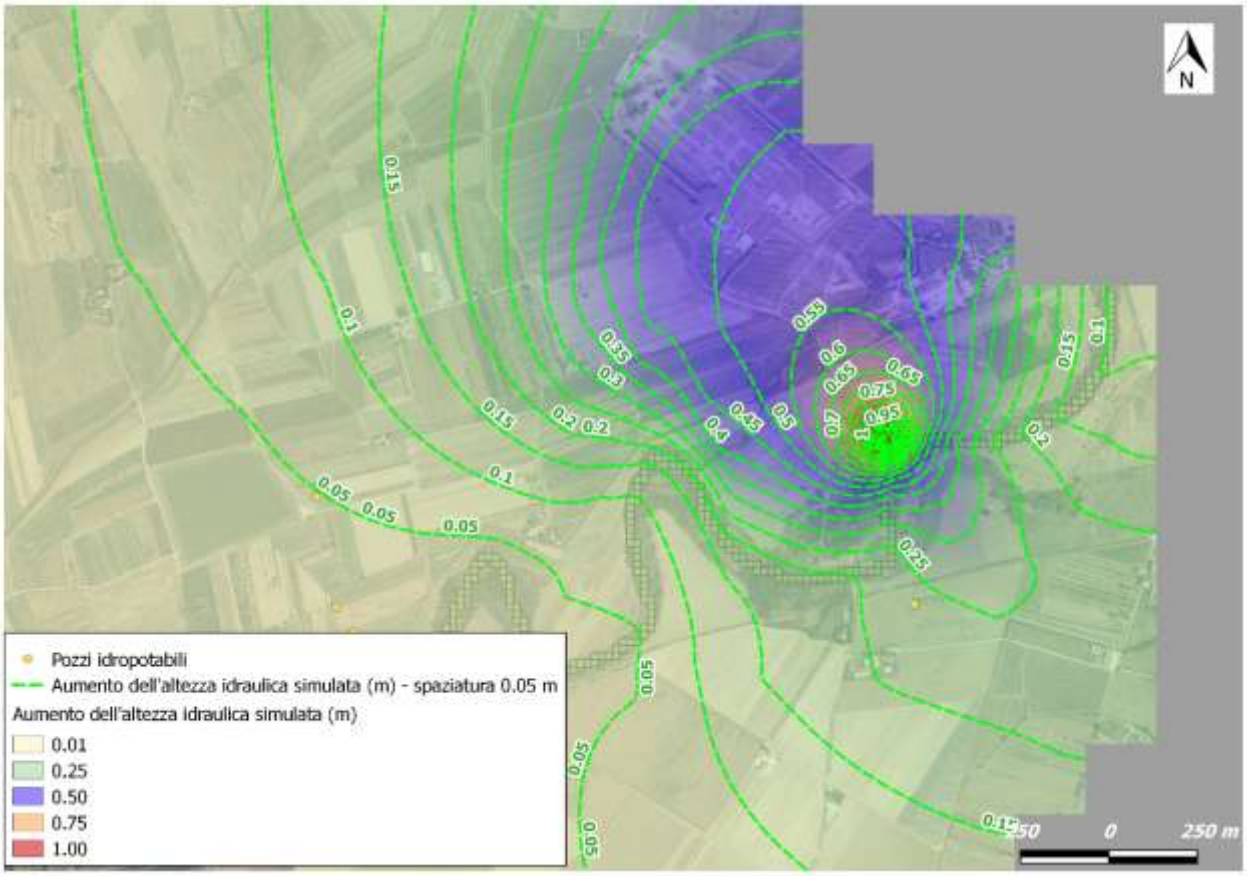


Fig. 12.2. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 25/01/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 50 l/s.

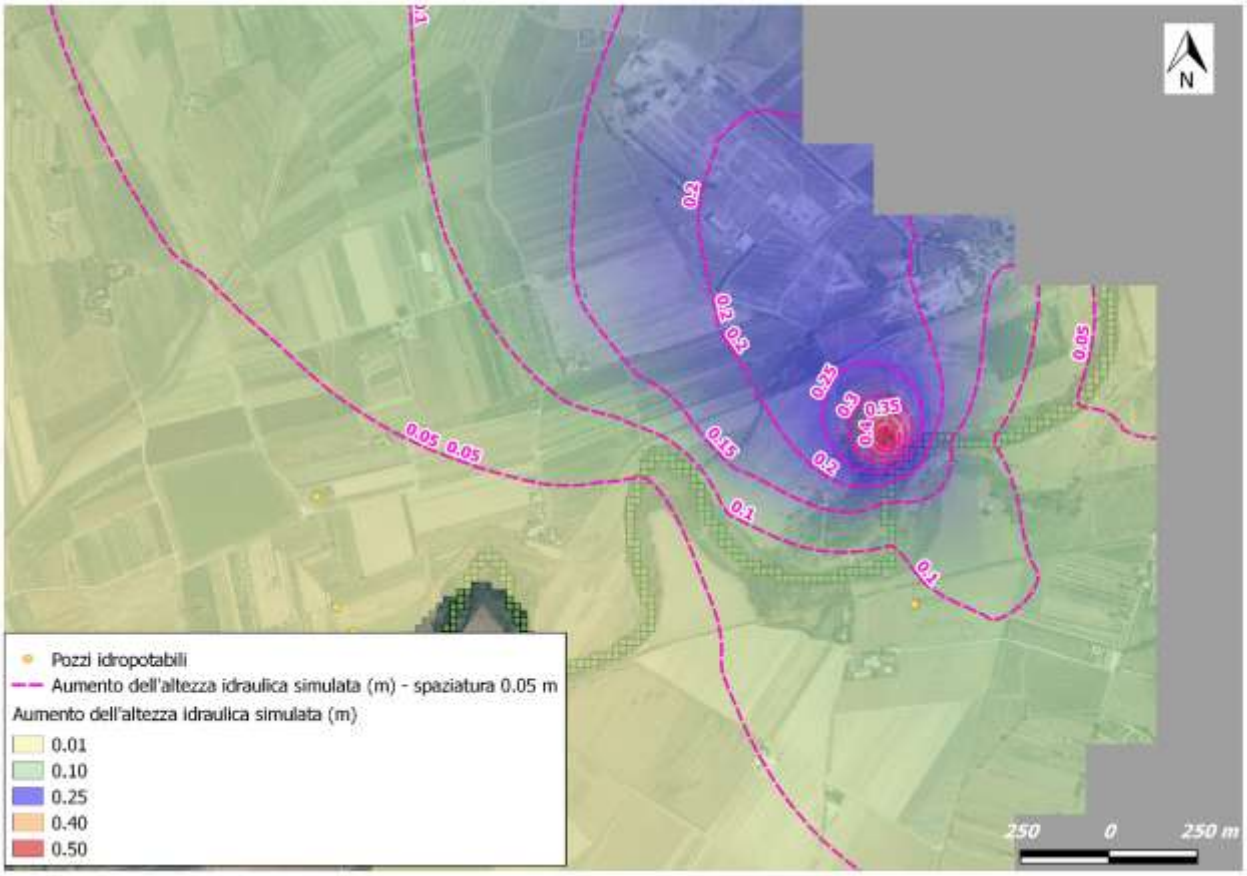


Fig. 12.3. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 11/05/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 20 l/s.

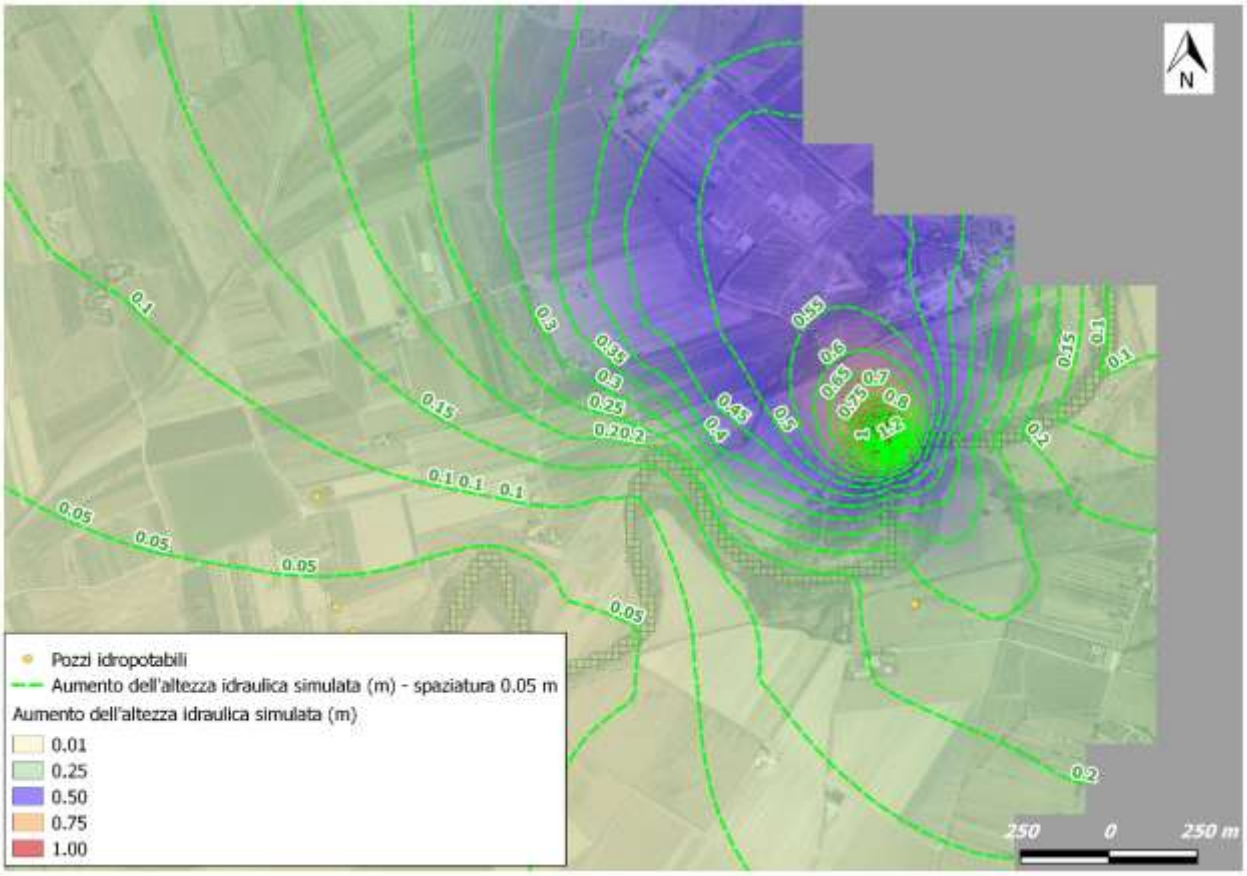


Fig. 12.4. ***Aumento dell'altezza idraulica simulata al 11/05/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 50 l/s.***

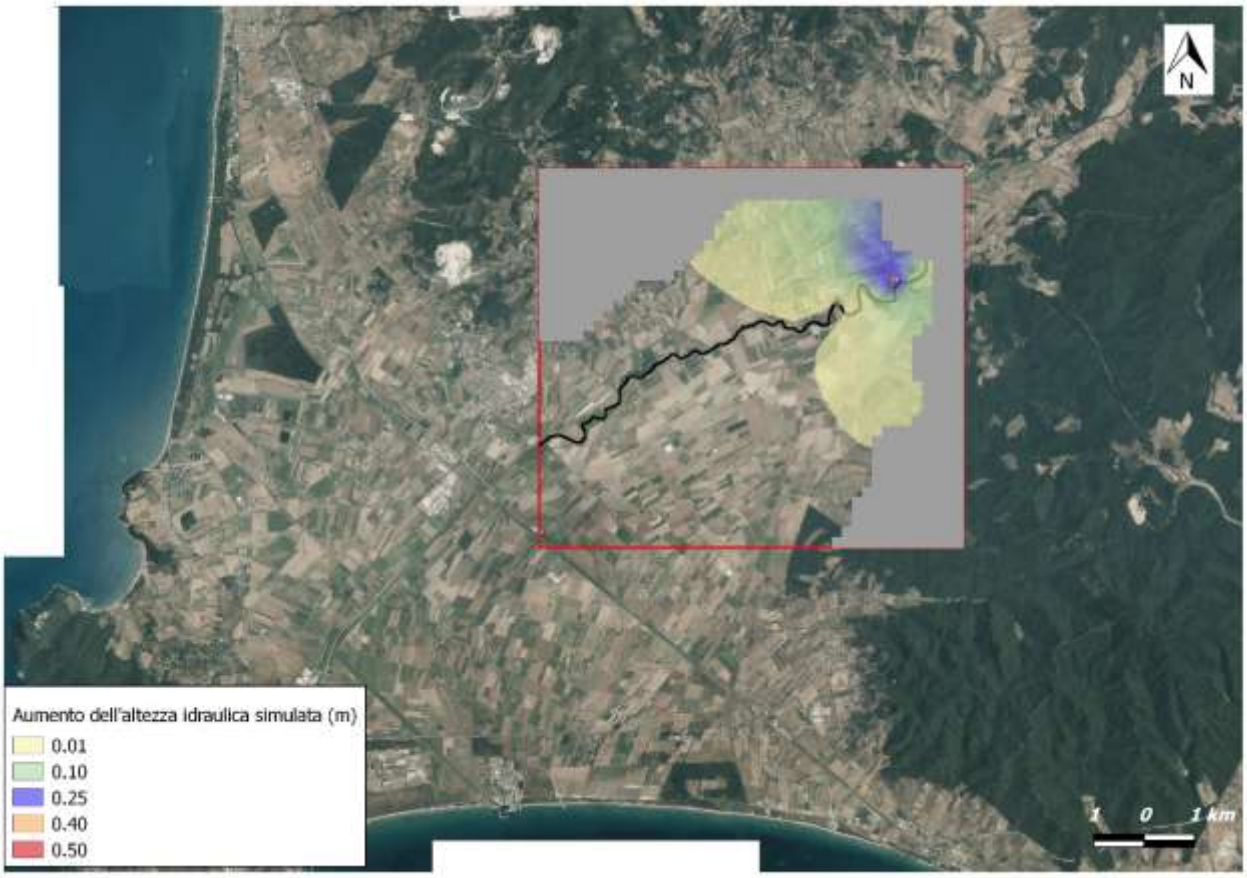


Fig. 12.5. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 11/05/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 20 l/s – zoom sull'intero dominio di studio.

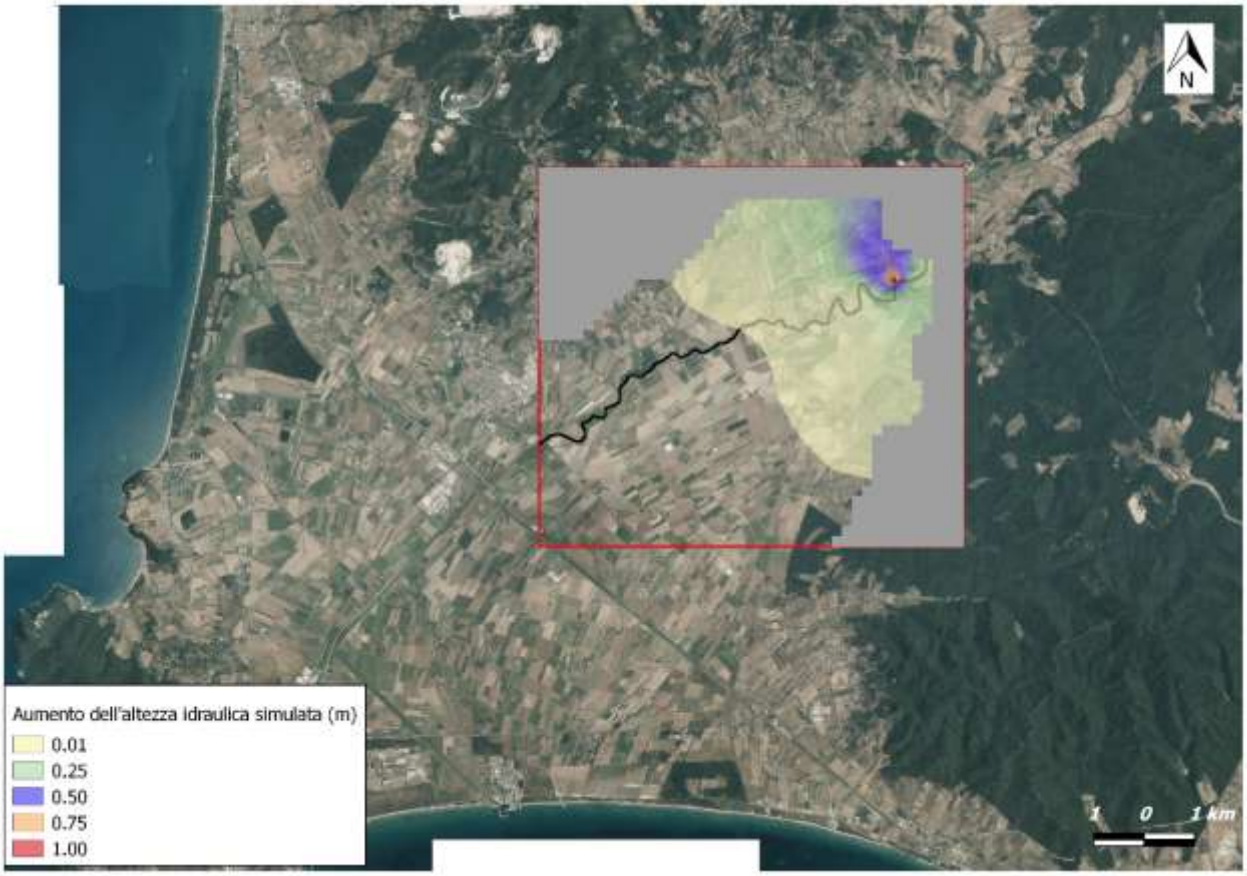


Fig. 12.6. Aumento dell'altezza idraulica simulata al 11/05/2017 dopo la messa in opera dell'impianto di ricarica con flusso di 50 l/s – zoom sull'intero dominio di studio.

PARTE C:

Informazioni generali sul corpo idrico donatore superficiale

Informazioni di carattere generale sul corpo idrico donatore superficiale sono state ampiamente fornite nella Parte C del progetto preliminare ed ulteriori informazioni sono riportate nella Parte A del presente progetto.

13. Modellazione della derivazione dal Fiume Cornia

Come riportato nella Sezione 16 del Progetto preliminare, per il bacino del Fiume Cornia, l'Autorità di Bacino Regionale Toscana Costa, ha stabilito un minimo deflusso vitale pari a 500 l/s alla sezione di Forni. Tale valore veniva giustificato nella necessità di mantenere in alveo una portata di 100 l/s a fronte di una infiltrazione di subalveo di 400 l/s nell'area del presente intervento, infiltrazione in parte imputabile anche ai lavori di movimentazione del fondo alveo eseguiti negli anni 1990-2003. Da allora tali interventi non sono più stati eseguiti e nel tempo, come dimostrato dalle indagini fin qui condotte, tale valore si è naturalmente ridotto, con la deposizione locale di depositi fini e la formazione di pellicole di origine biologica che ostacolano l'infiltrazione. Le determinazioni effettuate ai fini della redazione di questo progetto riportano una perdita attuale di subalveo massima quantificabile in circa 160 l/s.

Sulla base di tali evidenze si sono definiti i livelli soglia oltre i quali dare luogo alla derivazione di acqua verso l'impianto di ricarica. tali valori soglia sono definiti alla stazione di monitoraggio di Guado dei Forni. In sintesi, considerando un valore massimo di infiltrazione di subalveo pari a 160 l/s e la necessità di mantenere in alveo almeno 100 l/s, la derivazione di acqua verso l'impianto di ricarica potrebbe avvenire solo in caso di portate uguali o superiori a 280 l/s. Analogamente la derivazione di 50 l/s dovrebbe avvenire solo in occasione di portate uguali o superiori a 310 l/s. La Fig. 13.1 riporta la curva di deflusso definita presso il Guado dei Forni.

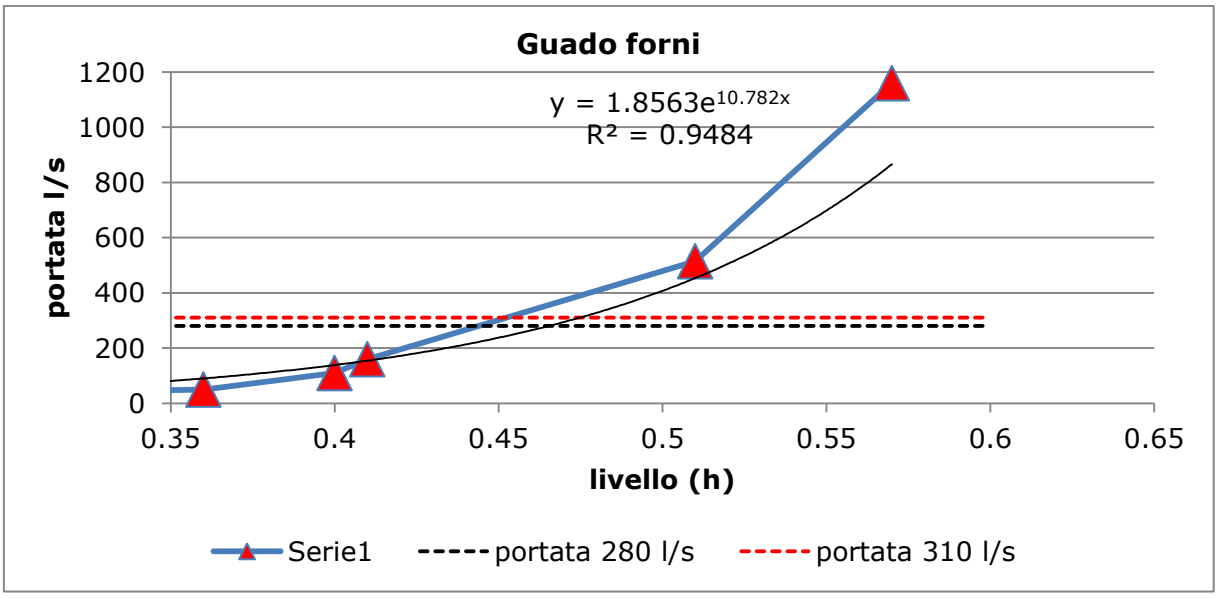


Fig. 13.1. Curva di deflusso sperimentale determinata presso il Guado dei Forni.

Le soglie così determinate corrispondono alle quote di 29,755 m per la derivazione non superiore a 20 l/s e 29,756 m per attivare la derivazione pari a 50 l/s.

Si vuole inoltre ribadire come l'intervento in progetto si pone proprio come obiettivo la ricarica dell'acquifero da un lato, ed ha come conseguenza un parziale rilascio al deflusso del fiume a valle del punto di presa, in quanto la ricarica genera un alto piezometrico in corrispondenza della vasca, che distribuirà acqua sia verso il basso (infiltrazione) sia lateralmente (raggiungendo di nuovo quindi anche l'alveo del fiume). Infine, con la ridistribuzione di un'aliquota della quantità di acqua prelevata al deflusso superficiale che sarà ritardata in funzione della velocità di trasmissione in un mezzo poroso, si ha come benefica conseguenza una sorta di 'regimazione' dell'acqua di deflusso superficiale garantendo benefici, pur modesti, in condizioni di deflusso di magra. In definitiva, seguendo la logica adottata nella definizione di Minimo Deflusso Vitale sopra descritta, l'intervento di progetto, comporta un aumento complessivo delle percentuali di infiltrazioni del deflusso in alveo. Trattandosi infine di intervento sperimentale ai fini della mitigazione delle criticità dell'acquifero e non finalizzato all'aumento dei prelievi, dovrà essere inquadrato, da un punto di vista autorizzativo, non come una nuova concessione, ma come un intervento finalizzato alla tutela quantitativa della risorsa idrica.

14. DESCRIZIONE TECNICA DELLE OPERE DA REALIZZARE

Il progetto di ricarica della falda in condizioni controllate presentato in questo documento è a carattere sperimentale e prevede l'utilizzo di una depressione esistente del terreno, come superficie di invaso e di infiltrazione delle acque derivate dal Fiume Cornia nell'acquifero con finalità di miglioramento ambientale. La derivazione sarà attiva solo nel periodo di morbida e non andrà ad interferire in maniera significativa con il deflusso del Fiume Cornia. In particolare, per il carattere sperimentale dell'opera si prevede il suo funzionamento per due anni, 2017/2018 e 2018/2019, in linea con la durata del progetto LIFE REWAT.

Contestualmente saranno realizzate un'opera di presa ed un impianto di sollevamento sulla sponda in destra idraulica per collettare i volumi d'acqua derivati nel bacino suddetto.

La funzionalità dell'impianto è prevista nei mesi tra ottobre e maggio per un minimo quantitativo di acque derivate da Fiume Cornia per la ricarica quantificato in circa 360000 m^3, corrispondente ad una derivazione media di circa 20 l/s verso l'impianto di ricarica per 210 giorni. L'obiettivo ottimale è la derivazione di circa 600000 m^3 dal Fiume Cornia nel periodo sopraindicato, corrispondente ad una derivazione media di circa 35 l/s verso l'impianto di ricarica per 210 giorni. La massima derivazione attesa è valutabile in circa 1.000.000 m^3/anno, corrispondenti ad una derivazione media pari a 50 l/s.

A differenza di quanto previsto nel progetto iniziale al posto del generatore sarà realizzata una linea provvisoria di cantiere mediante un cavidotto interrato dalla cabina MT/BT in località Forni fino al nuovo impianto, per l'alimentazione delle pompe e della strumentazione di controllo.

14.1 Opera di presa

Sarà costituita da un pozzetto ad elementi prefabbricati di dimensioni interne 1.5 x 1.5 m da posizionare in prossimità della sponda destra del Fiume Cornia. Sulla parete del pozzetto prospicente il fiume sarà collocata esternamente una griglia grossolana per intercettare pietre e vegetazione trasportati dalla corrente ed internamente una paratoia/soglia regolabile in modo da poter determinare il livello minimo di prelievo di acqua dal fiume. Al fine di proteggere l'opera di presa dall'azione della corrente, sarà posizionata una scogliera in massi che si estenderà per 10 m a monte e 10 m a valle del pozzetto. Sul lato opposto alla griglia sarà collegata una tubazione in pvc del diametro di 400 mm che convoglierà l'acqua derivata alla stazione di sollevamento posta nelle vicinanze.

14.2 Impianto di sollevamento

Analogamente all'opera di presa sarà costituito da due pozzetti in elementi prefabbricati di dimensioni interne 1.5 x 1.5 m da posizionare a circa 20 m dalla linea di

sponda attuale del fiume. All'interno del primo pozzetto varrà posizionata una sonda multiparametrica per il monitoraggio continuo della qualità delle acque mentre nel secondo verrà posizionata una pompa alimentata tramite inverter con portata variabile da 20 l/s a 50 l/s in modo da rendere l'impianto modulare e poter derivare i volumi d'acqua previsti in diverse condizioni di flusso del corso d'acqua. La pompa sarà collegata ad un collettore interrato in pead del diametro esterno di 315 mm che convoglierà l'acqua verso il bacino posto ad una distanza di circa 50 m. La pompa entrerà in funzione solamente in determinate condizioni di portata del corso d'acqua ovvero nei periodi in cui verrà superato il valore di deflusso minimo vitale.

14.3 Bacino di sedimentazione e infiltrazione

Il bacino di ricarica è localmente già presente grazie ad una serie di depressioni circa 2m dal piano campagna. Una di queste ben conformata come arginatura, dimensioni e profondità si presta all'utilizzo prefissato nel progetto. Nella fattispecie il bacino che sarà utilizzato ha dimensioni planimetriche medie di 145 x 25 m per una profondità massima di circa 2.2 m. Lo sviluppo superficiale è di circa 2400 m^2 che saranno divisi con un setto di separazione riportato in terra rispettivamente 1/3 700 m^2 come vasca di sedimentazione e 2/3 1600 m^2 come vasca di infiltrazione. La suddivisione si rende necessaria onde minimizzare i fenomeni di clogging legati alla ricarica con acque ricche in carico solido.

Alle due vasche sarà conferita una leggera pendenza costante verso Nord in modo da favorire l'allagamento di tutta la superficie disponibile e la ricarica secondo il principale deflusso di falda verso Nord. Il setto di separazione sarà realizzato all'interno della vasca con terra prelevata dalla escavazione della stessa. Nell'argine sarà prevista una soglia con stramazzo, posto a quota inferiore alla sommità arginale, per il passaggio dell'acqua da un parte all'altra del setto.

Attorno alla vasca, a scopo precauzionale, sarà collocata una recinzione con rete elettrosaldata a maglia larga sollevata dal suolo di 20cm in modo da consentire il passaggio degli animali. La stessa sarà sorretta da pali in legno.

14.4 Opere elettriche

In base ai sopralluoghi effettuati e a valutazioni di carattere gestionale tra i tecnici del Consorzio, ASA ed il gestore della rete elettrica, si è ritenuto di realizzare la fornitura elettrica tramite collegamento di cantiere alla rete Enel piuttosto che l'utilizzo di un motogeneratore da posizionare vicino all'impianto. Quest'ultimo sistema avrebbe richiesto un continuo monitoraggio da parte del personale ed il posizionamento in una zona ad alto rischio esondazione. In quest'ottica la relativa voce del piano economico dell'Azione B4 prevista dal progetto EU LIFE REWAT viene così modificata:

- Nolo pompa e gruppo elettrogeno verrà sostituito dalla realizzazione della fornitura ENEL e del quadro elettrico di cantiere a parità di importo.

Il collegamento provvisorio di cantiere è costituito da un cavidotto lungo circa 600 m che si estende dal sito dei lavori fino alla cabina elettrica di trasformazione posta in località Forni e dai quadri elettrici necessari per il comando dell'impianto di sollevamento.

Il tracciato del cavidotto si sviluppa lungo una strada campestre denominata Strada Vicinale del Casalone, che dall'abitato della loc. Forni raggiunge il Fiume Cornia. Il primo tratto di circa 50 m è pavimentato con asfalto mentre il resto è sterrato. Trattandosi di un tratto interno all'urbanizzazione IU11 il cavidotto sarà portato fino alla zona di futura edificazione della cabina MT/BT per poi proseguire verso quella esistente il tutto percorrendo le aree che diverranno la viabilità interna all'urbanizzazione.

Appena fuori dal limite di piano attuativo dell'urbanizzazione, la strada vicinale suddetta scavalca con due rampe in terra l'argine remoto del Fiume Cornia.

All'estremità del cavidotto, in posizione concordata con ENEL, saranno posizionati il contatore ed il quadro di protezione linea. Da questo punto il cavidotto proseguirà verso i quadri di comando dell'impianto che saranno collocati in zona accessibile all'estremità nord della vasca di infiltrazione.

14.5 Rispondenza al PIT

Come evidenziato nell'elaborato del file Tav.B6.pdf Corografia Generale, gli interventi proposti ricadono in area soggetta ai vincoli di cui all'Art. 142 c.1 lett b, c, g, del D.Lgs. 152/06 (Codice dell'Ambiente). Tutti gli interventi sono coerenti con gli obiettivi e le direttive e rispettano le prescrizioni di cui agli art. 7, 8 e 12 dell'elaborato del PIT "8B - Disciplina dei beni paesaggistici" (art.134 e 157 del Codice).

Al fine di rispettare le summenzionate indicazioni si prevedrà:

- Relativamente alla lett. b – Area tutela contermini ai laghi, ad interrare il cavidotto provvisorio lungo la strada vicinale del Casalone per tutta la sue estensione in modo da non ridurre l'accessibilità ai luoghi;
- Relativamente alla lett. c – Area tutela fiumi torrenti e corsi d'acqua, ad interrare tutte le tubazioni ed a costruire a raso le opere impiantistiche in modo da non creare ostacolo al deflusso delle acque e mantenere inalterata l'accessibilità al corso d'acqua;
- Relativamente alla lett. g – Area tutela foreste e boschi, ad evitare alterazioni significative permanenti del paesaggio evitando il taglio di alberi di alto fusto;

14.6 Opere di inserimento paesaggistico

Al fine di inserire le opere nel contesto paesaggistico fluviale/boschivo, si prevede di costruire il setto di separazione delle vasche con terreno di risulta proveniente dalla risagomatura delle vasche stesse, di inserire un tipo di recinzione a maglia larga con pali in legno che ben si integra con la zona e di mitigare la scogliera di protezione dell'opera di presa con la piantumazione di essenze autoctone reperite in loco. La vasca di

sedimentazione verrà piantumata con specie adatte all'area umida, si da favorire la decantazione dei sedimenti.

15. ANALISI ECONOMICA DELL'INTERVENTO

I tecnici di ASA spa hanno preparato per il presente progetto il Quadro Tecnico Economico per la realizzazione dell'opera (file AQTE.pdf in allegato) ed il Computo Metrico Estimativo (file A2_CME.pdf in allegato). I costi vivi totali per messa in opera dell'intervento, ossia la sistemazione delle vasche, l'opera di presa, l'impianto di sollevamento, le opere elettriche e gli oneri di sicurezza ammontano ad un totale di 126.514,95 €. A questi costi si aggiungono ulteriori 75000 € per la messa in opera del sistema di monitoraggio *post-operam* e di prima allerta.

A questi costi, si sommano i costi di personale delle unità coinvolte nel progetto EU LIFE REWAT, da considerarsi quale cofinanziamento "*in-kind*" al progetto valutabili in circa 175.000 €.

Il costo totale di realizzazione dell'opera è quindi pari a circa 377000 €.

Il costo di realizzazione dell'opera per m^3 di acqua immagazzinata è quindi variabile tra 1,05 €/m^3 nel caso di minima ricarica (pari a circa 300000 m^3/anno) e 0,38 €/m^3 (pari a circa 1000000 m^3/anno di acqua immagazzinata).

15.1 Opzione zero e scelte alternative

I sistemi di ricarica controllata attraverso bacino d'infiltrazione sono noti come sistemi di *water banking.* Sono sistemi con una economicità intrinseca in quanto sfruttano come serbatoio il sottosuolo, gli acquiferi esistenti.

Nella Val di Cornia, la situazione di disequilibrio idrogeologico non permette di fatto un'opzione zero, poiché il perdurare della situazione attuale porta inevitabilmente a fenomeni di intrusione salina sempre più marcati nel tempo, con conseguente drastica diminuzione della qualità e della quantità disponibile di risorsa idrica per gli scopi idropotabili e irrigui dell'area, con costi ambientali e sociali particolarmente elevati.

Quanto alle scelte alternative, si deve ricordare che i sistemi di *water banking* permettono di immagazzinare acqua nei momenti in cui, come nel caso della Val di Cornia, questa è presente. In particolare, nei periodi/anni con intense precipitazioni, l'impianto in esame è in grado di immagazzinare quantitativi anche superiori al milione di m^3 prospettato in questo progetto, e dipendente solo dal dimensionamento della pompa definita sulla base dell'esperienza pilota. Questo in quanto l'acquifero della Val di Cornia permette di immagazzinare rilevanti volumi, nell'ordine di milioni di m^3 con la presente tecnica.

Si rileva inoltre come l'impianto in esame, di carattere sperimentale, non sia isolato, ma rientri in un insieme di attività, facenti parte del progetto EU LIFE REWAT. Tali attività sono volte non solo ad aumentare la capacità d'infiltrazione dell'acquifero (con questo sistema e con l'intervento di riqualificazione dell'alveo fluviale), ma anche a sviluppare e promuovere metodi più efficienti di uso dell'acqua in campo irriguo (irrigazione delle colture per sub-irrigazione), utilizzo di risorse idriche diverse da quelle di falda, come le acque reflue in uscita da un depuratore, per usi non idropotabili

(impianto pilota d'irrigazione di un campo sportivo con acque da impianto di trattamento dei reflui urbani di Campo di Gallio, Comune di Campiglia Marittima) e metodi di monitoraggio e controllo delle perdite nel sistema acquedottistico di Piombino.

Considerando l'insieme delle azioni svolte dal progetto Life-REWAT, il sistema di ricarica in condizioni controllate risulta essere una soluzione più efficiente ed economica rispetto ad interventi quali creazioni di bacini artificiali, particolarmente costosi in termini di costi di costruzione, ambientali ed accettabilità sociale.

Infine, data la conformazione dell'area, la tecnica del bacino d'infiltrazione risulta il metodo di ricarica controllata più economico sul lungo periodo, rispetto ai sistemi che infiltrano attivamente acqua, quali ad esempio l'uso di pozzi di ricarica. Ulteriori benefici da considerare si hanno in quanto il sistema di ricarica infiltra acqua che verrà in parte restituita, più a valle, al Fiume Cornia, contribuendo anche ad incrementare le portate nel corpo idrico fluviale durante i periodi di magra.

16. ANALISI DI RISCHIO

16.1 Introduzione

Come richiesto nel DM 100/2016, si presenta l'analisi di rischio per l'impianto di ricarica in condizioni controllate "includendo il rischio di contaminazione chimica e microbiologica in considerazione degli utilizzi delle acque, con particolare riguardo all'approvvigionamento di acque da destinare a consumo umano" (Allegato 1 parte B 4, punto c-3).

L'analisi di rischio applicata a sistemi di ricarica è tecnicamente complessa, a causa delle numerose incertezze date dalle eterogeneità sotterrane, dall'esistenza di più origini, recettori e percorsi di esposizione a sostanze di diversa natura che possono raggiungere l'area in esame. Vanno inoltre presi in considerazione rischi legati ad altri eventi, quali inondazioni, vandalismi, siccità prolungate e malfunzionamenti che possono diminuire sensibilmente, se non drasticamente, l'operatività e l'efficienza del sistema. L'analisi di rischio di un simile sistema complesso prevede la necessità di considerare elementi molto diversi fra loro: nell'origine (non solo i diversi inquinanti, ma anche elementi fisici, economici, normativi), nei percorsi e processi (inquinanti diversi con caratteristiche diverse, alluvioni, eventi occasionali…) e nei bersagli (persone, zone protette ma anche economia, limiti normativi…).

A fronte di queste problematiche, nell'ambito del progetto europeo FP 7 MARSOL, volto a dimostrare la validità dei sistemi di ricarica controllata degli acquiferi (MAR) per far fronte ai problemi di scarsità idrica e siccità, è stata definita una metodologia adatta a raggruppare in un unico strumento le analisi per i potenziali rischi associati ai sistemi MAR. Questa metodologia permette un'analisi globale e multidisciplinare del rischio nelle varie forme che può assumere in questi sistemi (Sanchez-Vila et al., 2015).

Questo approccio prevede l'uso della metodologia dell'albero dei guasti, usato in ingegneria per l'analisi dei rischi di fallimento in un sistema, e la sua applicazione ai sistemi MAR, in particolare quelli che impiegano vasche d'infiltrazione. L'idea sviluppata dal progetto MARSOL consiste nel suddividere il problema generale in una serie di eventi individuali e meno complessi, per valutare il rischio di guasto per ognuno di essi, permettendo quindi di considerare quali siano gli eventi che più contribuiscono al rischio finale, o che più portano incertezza nel sistema. Il risultato di questa metodologia permette di individuare le criticità più importanti su cui investire di conseguenza, e contemporaneamente fornisce una rappresentazione che permette ai portatori d'interesse di visualizzare facilmente dove, di che tipo e con che intensità siano questi rischi.

L'approccio sviluppato dal progetto MARSOL prevede l'uso dell'algebra booleana per individuare, per ogni ramo dell'albero dei guasti, se e quali siano gli eventi che generano i principali rischi di fallimento. Questo metodo rende facilmente identificabili le le principali criticità, ed è anche facilmente aggiornabile usando i dati provenienti dai monitoraggi.

16.2 Albero dei guasti

L'uso dell'albero dei guasti permette di suddividere il sistema complesso in moduli quasi indipendenti e più gestibili (de Barros et al, 2011) a cui corrispondono diversi tipi di rischi, a loro volta suddivisi nei singoli eventi che possono portare al fallimento del sistema. Una volta che ognuno dei problemi minori è stato così identificato, ne viene calcolata la probabilità che esso si verifichi. L'albero dei guasti fornisce una facile visione d'insieme dei risultati dell'analisi del rischio.

Affinché l'analisi del rischio basata su un albero dei guasti sia rigorosa, la metodologia sviluppata dal progetto MARSOL considera i passi indicati da Bedford e Cooke, 2003:

1) Definire cosa si intenda come fallimento del sistema in esame;
2) Identificare gli eventi chiave che possono potenzialmente causare questo fallimento;
3) Costruire l'albero dei guasti che indichi le combinazioni degli eventi;
4) Sviluppare una rappresentazione probabilistica dell'albero dei guasti, usando l'algebra booleana;
5) Calcolare le probabilità degli accadimenti degli eventi individuali;
6) Usare le probabilità ottenute dai singoli eventi per calcolare il rischio globale di fallimento del sistema.

In questo metodo, ogni singolo evento è considerato in modo indipendente dall'altro, e l'albero dei guasti permette di visualizzare facilmente dove risiedono i principali rischi di fallimento e le incertezze nel sistema, facilitando la scelta delle decisioni da prendere, permettendo una gestione dinamica del sistema.

Di seguito viene riportato un esempio dei passi svolti per costruire l'albero dei guati.

Il primo passo è definire cosa viene inteso come fallimento del sistema (SF), solitamente si considera quando il rischio eccede un valore soglia definito per legge:

$$R > R_{crit}$$

Vengono quindi individuati gli eventi chiave, e le loro interazioni. Ad esempio, due eventi chiave tipici delle analisi di rischio dei MAR riguardano la possibile contaminazione dei corpi idrici e le possibili conseguenze sulla salute umana. I due eventi sono separati, perché se è vero che il secondo non sussiste in assenza del primo, non è detto che il primo causi il secondo.

Il componente chiave del primo evento è la "Concentrazione critica di esposizione " (CCE_i), ed è definito come l'evento in cui un contaminante *i* arriva ad una certa zona sensibile (target) con una concentrazione che eccede un valore critico. Solo se questo accade, vi è una possibilità di conseguenze sulla salute umana. Associato all'evento CCE_isi devono considerare tre sotto eventi:

- Caso di origine (Source Occurrence, SO_i): la probabilità che un evento di contaminazione possa accadere;

- Percorso/i del pennacchio ($P_{2,i}$): indica la possibilità che il pennacchio di un inquinante raggiunga la zona bersaglio;
- Attenuazione Naturale (NA) Insufficiente (Tartakovsky, 2007): rappresenta la possibilità che reazioni, dispersione e diluizione possano non diminuire sufficientemente la concentrazione dei contaminanti, che restano a valori sopra la soglia critica.

Il componente chiave del secondo evento è

- Componente fisiologica caratteriale (BPC_i): l'evento che un individuo abbia un certo valore di β, ossia il coefficiente collegato ai vari percorsi di contatto col contaminante (ingestione, contatto, inalazione) e risultato di parametri comportamentali e fisiologici dell'individuo (ossia tasso d'ingestione, durata e frequenza d'esposizione, peso corporeo).

Perché quindi si abbia effettivamente il fallimento del sistema, non si deve considerare solo l CCE_i, ma anche la componente BPC_i della popolazione bersaglio, che varia all'interno della popolazione bersaglio in funzione dei valori di β (si pensi a persone con varie forme di immunodeficienza, ad esempio).

Si può quindi iniziare a costruire l'albero dei guasti, partendo dalla descrizione dello scenario di contaminazione idrogeologica che porta all'evento chiave CCE_i. Questo primo ramo viene poi collegato al ramo della componente BPC_i. Il ramo completo per il contaminante *i* è dato dalla somma dei rami CCE_i e BPC_i. Infine, l'albero completo (almeno per i rischi di contaminazione idrogeologica) è costituito dalla ripetizione di questi rami per tutti i contaminanti considerati (Fig. 16.1). L'albero dei guasti collega i vari eventi tramite le porte logiche booleane:

- l'operatore logico AND indica il prodotto logico fra i rami ad esso collegati, ad esempio perché si verifichi la CCE_i, è necessario che si verifichino contemporaneamente SO, P2,i e NA ($CCE_i = SO_i$ {AND} $P_{2,i}${AND} NA);
- l'operatore logico OR indica somma logica, e significa che il rischio di fallimento di sistema si ha quando anche uno solo dei contaminanti supera il valore di R_{crit}.

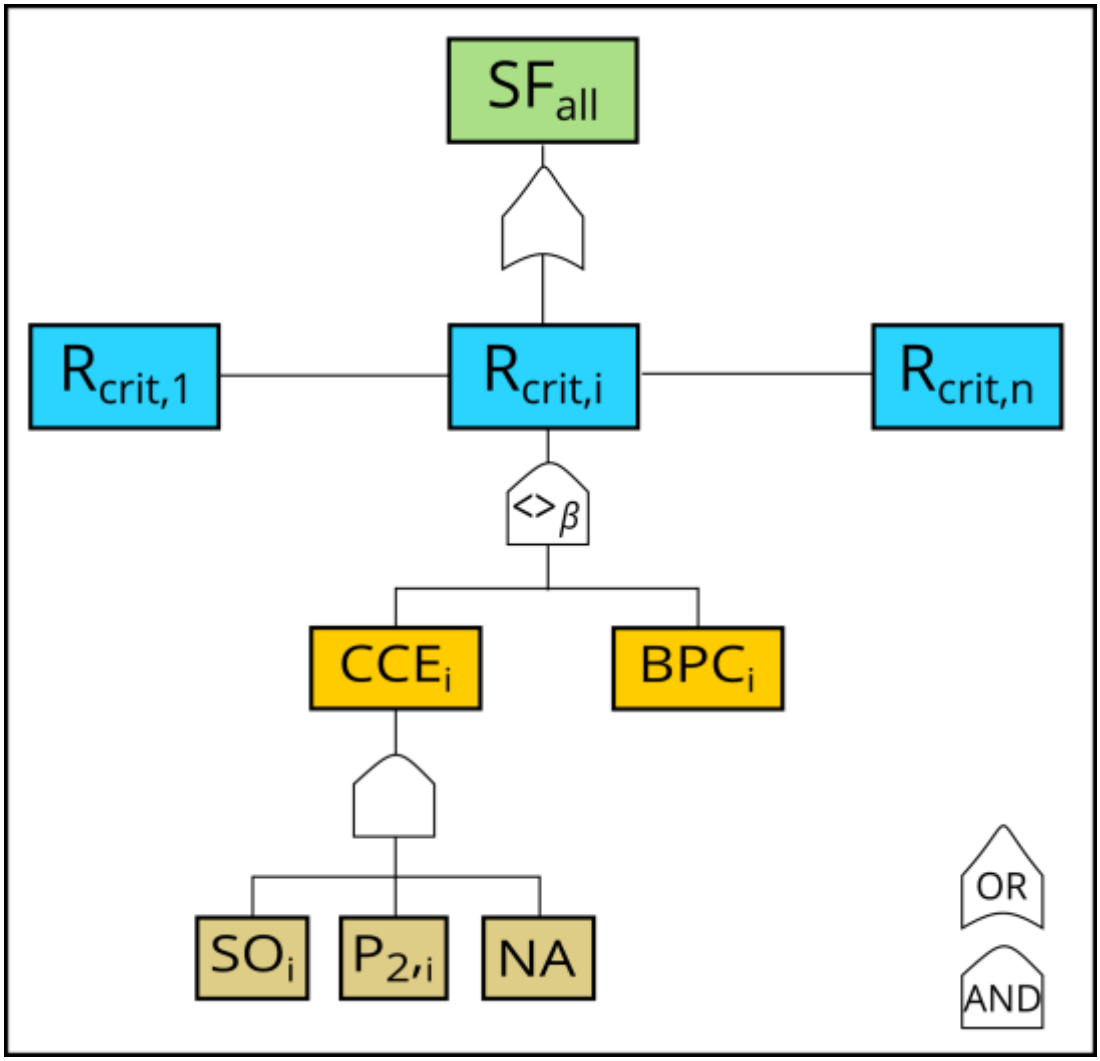


Fig. 16.1. Rappresentazione schematica di un albero di guasti per il rischio di contaminazione idrogeologica per una serie di *n* contaminanti.

Per tenere conto dei diversi valori di β all'interno di una popolazione target, questa metodologia considera anche l'operatore booleano ENSEMBLE AND (<>β, in Fig. 16.1), specificamente ideato a questo scopo (de Barros et al., 2011), che indica la necessità di calcolare l' $R_{crit,i}$ mediato sul range dei valori di β presenti nella popolazione (se si usasse un solo specifico valore di β, il valore di sarebbe preciso $R_{crit,i}$ solo per il corrispondente tipo di persona) (de Barros et al., 2011). Infine, vengono calcolate le effettive probabilità per ogni singola porzione dei rami dell'albero dei guasti. Ad esempio, l'evento CCEi, descritto dall'espressione logica booleana CCE_i = SO {AND} $P_{2,i}${AND} NA, ha una probabilità di accadimento di (Sanchez-Vila et al., 2015)

$$P(CCE_i) = P\left(\frac{SO_i}{P_{2,i}}\right) P(NA)$$

In quanto SO, $P_{2,i}$ e NA sono eventi indipendenti. La probabilità effettiva di fallimento legata ad un contaminante *i*, descritta dall'espressione logica booleana $R_{crit,i}$= CCE_i {AND} BPC_i, è

$$P\left(R_{crit,i}\right) = P(CCE_i)P(BPC_i)$$

Mentre la probabilità totale effettiva di fallimento del sistema quando sono presenti *n* contaminanti, descritta dall'espressione logica SF_{all}= $R_{crit,1}${OR}$R_{crit,i}${OR}…{OR}$R_{crit,n}$, è

$$P(SF_{all}) = P(SF_1) + P(SF_i) + \cdots + P(SF_n)$$

Il rischio totale di fallimento del sistema è quindi la somma dei contributi delle probabilità di accadimento di fallimento di ogni singolo contaminante presente.

16.3 MAR-RISKAPP

Nell'ambito del progetto MARSOL, è stato sviluppato MAR-RISKAPP, uno strumento di valutazione del rischio per le attività MAR (Rodriguez-Escales et al., 2016), per comprendere e visualizzare facilmente quali siano le origini dei principali rischi di fallimento del sistema, e dunque dove destinare le maggiori attenzioni. Questo strumento, programmato in Microsoft Excel®, è stato già applicato nei 7 siti dimostrativi di ricarica controllata del progetto MARSOL. MAR-RISKAPP si basa sull' albero dei guasti e su un questionario apposito, con il preciso scopo di creare una struttura per valutare la percezione del rischio ed i rischi di fallimento di un sistema MAR.

Il questionario elenca i singoli eventi che compongono l'albero dei guasti di un'analisi del rischio per sistemi di ricarica controllata. Gli eventi indicati dal questionario riguardano sia la progettazione e la costruzione dell'impianto (40 eventi), sia operativi (66 eventi). Per ognuno dei singoli eventi, MAR-RISKAPP permette di indicare, sulla base delle opinioni di esperti (ingegneri, geologi, scienziati ambientali, ad esempio) il livello di rischio atteso per quell'evento nel sito in esame. MAR-RISKAPP traduce la scelta di rischio in una corrispettiva probabilità di accadimento dell'evento. Questa probabilità a priori è stata definita (per ogni classe di rischio per ogni singolo evento indicato) da un team interdisciplinare di esperti dopo aver lavorato da 2 a 6 anni sul sito di ricarica artificiale tramite vasca d'infiltrazione di Sant Vincenc dels Horts (Barcellona), sull'acquifero alluvionale del delta del Fiume Llobregat. Questi criteri a priori sono stati confrontati con un'esauriente lista di problemi degli impianti MAR descritti in letteratura. I criteri a priori possono essere rivisti nel tempo, in funzione delle informazioni provenienti dalle campagne di monitoraggio e simulazione con modelli numerici. I valori a priori devono essere inseriti solo per gli eventi singoli, da questi MAR-RISKAPP calcola le probabilità degli eventi composti utilizzando l'algebra booleana dell'albero dei guasti. Queste probabilità sono calcolate considerando le situazioni AND e OR. Con AND la situazione implica che la probabilità di accadimento di una categoria di rischio è data dall'intersezione delle categorie che lo definiscono. Per esempio, una categoria quale il fallimento della vasca di sedimentazione è definito da due ipotetiche sottocategorie: il guasto del filtro e il tempo di residenza. La probabilità di rischio di questa categoria è data da: Probabilità di guasto del filtro * il tempo di residenza – (probabilità di guasto del filtro di carta * il tempo di residenza). OR implica invece la probabilità di accadimento di una categoria di rischio è uguale alla somma delle sottocategorie che la definiscono. Ad

esempio, la categoria di rischio Limiti Territoriali ha tre sottocategorie: Europeo – Eu, Nazionale – Nat, Reginale/Locale – Reg/Loc. In questo caso la probabilità di questa categoria è: Eu+Nat+RegLoc – (Eu*Nat) – (Eu*RegLoc) – (Eu*Nat*RegLoc).

Calcolati i vari valori delle probabilità di accadimento per ogni evento e categoria di rischio, i risultati possono essere visualizzati graficamente attraverso grafici ad albero e tabelle. Nelle tabelle, i risultati sono suddivisi in quattro categorie di rischio (alto, medio, basso, nessun rischio), e dentro ogni categoria, i valori del rischio sono mostrati in ordine decrescente. Per i grafici ad albero, ogni evento è presentato come un rettangolo, ed in ogni rettangolo è indicato il corrispettivo valore quantitativo di rischio calcolato. Per facilitare la visualizzazione, ogni rettangolo è colorato secondo una scala collegata al rischio, con giallo per gli eventi con probabilità di rischio di fallimento di circa 0.5, di rosso per i casi con probabilità che tende ad 1.

16.4 Analisi di rischio del sistema di ricarica controllata nella bassa Val di Cornia

La metodologia per l'analisi del rischio sopra descritta è stata applicata al sistema di ricarica controllata di Suvereto. La vasca d'infiltrazione è stata già realizzata, così come la rete di monitoraggio *ante-operam*, già attiva. Questi fatti, assieme all'assenza nell'area di vincoli normativi, permette di focalizzare l'attenzione sull'analisi di rischio dei processi operativi del sistema. L'albero dei guasti dei processi operativi è suddiviso in due rami principali: i limiti (o forzanti) non tecnici, ed i limiti tecnici. Di seguito sono descritti i potenziali rischi presenti in questi rami. In queste analisi, sono usati valori a priori sulla base di quelli usati dai progetti pilota di impianti di ricarica del MARSOL, aggiornati in funzione delle caratteristiche del sito in esame.

16.4.1 Limiti non tecnici

Comprende i limiti normativi, economici, di accettazione sociale e di gestione e manutenzione (Tab. 16.1). Data la collocazione dell'area ed i relativamente bassi costi di questo tipo di sistema di ricarica, i limiti non tecnici non appaiono essere elementi preoccupanti per il rischio di fallimento dell'impianto di Suvereto.

Riguardo i limiti normativi, stando i dati provenienti dai monitoraggi in loco dell'ARPA Toscana (che classificano, nel tratto interessato, il Cornia come fiume con stato chimico delle acque BUONO) e i dati del monitoraggio *ante-operam*, l'acqua che verrà infiltrata non presenta nessuna criticità legata al rispetto delle Tabelle 1, 2 e 3 del D.Lgs 30/2009. Ne consegue un basso rischio legato alla normativa nazionale, e dunque un rischio trascurabile riguardo la normativa europea, meno stringente. Come in altre aree dell'acquifero della Val di Cornia (dove ASA è dovuta ricorrere all'uso di costosi dearsenificatori), la concentrazione di arsenico nel piezometro REW6 è spesso superiore alla normativa. Ma, al contrario, tutte le misure fin qui condotte sul corpo idrico donatore, ossia quello chiamato a soddisfare i limiti normativi del D.Lgs 30/2009, mostrano livelli di As nettamente al di sotto della soglia normativa di 10 µg/l. Situazione simile riguarda il

boro, naturalmente presente nell'acquifero e misurato in concentrazioni superiori alla norma nel pozzo idropotabile già in uso da ASA SU01 - La Gera, posto a valle dell'impianto di ricarica, mentre è costantemente rilevato al di sotto della soglia di 1 mg/l nell'area dell'impianto di ricarica e nel Fiume Cornia. Per questi motivi, e considerando l'attento monitoraggio *post-operam*, il rischio legato al superamento delle soglie delle normative sulla salute pubblica può essere considerato un rischio decisamente ridotto. Inoltre, si deve considerare che il Fiume Cornia è naturalmente già in connessione idraulica con l'acquifero interessato, rappresentando un importante elemento della sua ricarica naturale, come ben evidenziato durante il monitoraggio *ante-operam*, dove le misure di portata svolte a Maggio 2017 hanno indicato un'infiltrazione di circa 50 l/s tra le aree a monte e a valle del sistema di ricarica. Ne consegue che eventuali contaminanti nel Fiume Cornia, causati ad esempio da versamenti accidentali, sarebbero già naturalmente in condizione di migrare nell'acquifero, a prescindere dell'azione di ricarica controllata. Data la situazione locale, il sistema di ricarica può essere considerato a tutti gli effetti come una stazione di monitoraggio avanzata sul Fiume Cornia.

Riguardo i limiti economici, si deve sottolineare come i sistemi di ricarica controllata con bacino d'infiltrazione sono tra i sistemi di ravvenamento delle riserve idriche più economici e realizzabili, in particolare rispetto ad altri quali ad esempio la creazione di bacini artificiali tramite diga o gli impianti di desalinizzazione. Le condizioni macroeconomiche non risultano quindi un limite stringente, anche a fronte di una condizione di forte disequilibrio quantitativo del bilancio idrogeologico, causato da un uso intensivo della risorsa idrica prevalentemente ad opera dei comparti irriguo, industriale e civile. Inoltre, poiché il funzionamento del sistema è previsto nei mesi tra ottobre e aprile e ricaricherà lo stesso acquifero alluvionale utilizzato per scopi idropotabili, irrigui e industriali (quest'ultimo scopo presente esclusivamente a valle dell'impianto) non sono prevedibili rischi di competizione per la risorsa idrica tra questo sistema e i tre ambiti elencati. Gli unici limiti economici sensibili sono i costi di mantenimento e gestione, comunque ridotti, per natura stessa dell'impianto (manutenzione della pompa e dei sensori, interventi di pulizia e rippaggio del fondo della vasca d'infiltrazione) e i limiti di finanziamento all'ente gestore.

Riguardo l'accettabilità sociale, non sono attese sensibili possibilità di fallimento, poiché la finalità del sistema è quella di aumentare le riserve idriche disponibili nel sistema sfruttando le acque naturalmente presenti in area, aumentando li volumi infiltrati nei periodi di portate maggiori. L'area, lontana da vincoli paesaggistici e centri urbani, vedrà un incremento dei sensori di allerta riguardo le caratteristiche dei corpi idrici superficiali e sotterranei. La vasca d'infiltrazione è di ridotte dimensioni, e per sua stessa natura non rappresenta un impatto all'aspetto estetico ambientale e del panorama.

Infine, riguardo la gestione e manutenzione, il progetto Life-REWAT, in cui è inserito l'impianto in esame, ha lo scopo di promuovere il coinvolgimento attivo dei vari attori nella gestione della risorsa idrica, sviluppando uno strumento di governance

integrato e partecipato per la gestione sostenibile della risorsa idrica, che si concluderà con la stesura di un "contratto per l'acqua" (mutuato dal ben noto "contratto di fiume"): un'esperienza innovativa a livello italiano che consiste in un accordo che coinvolge tutti gli attori nel programmare la gestione della risorsa idrica in un determinato bacino. Con tale strumento, si prevede un ridotto rischio di fallimento, nell'ambito della gestione e manutenzione.

		RISK PERCEPTION		
OPERATIONAL PROCESSES	NO RISK	HIGH	MEDIUM	LOW
1. NON-TECHNICAL CONSTRAINTS				
1.1 Legal constraints				
1.1.1 Territorialconstraints				
1.1.1.1 European	x			
1.1.1.2 National				X
1.1.1.3 Regional/Local	x			
1.1.2 Scope of legislation				
1.1.2.1 Health legislation				X
1.1.2.2 Others	x			
1.2 Economicconstraints				
1.2.1 Macroeconomicconstraints	x			
1.2.2 Microeconomicconstraints				
1.2.2.1 Not enough water to recharge due to other economical uses				
1.2.2.1.1 Industrial use	x			
1.2.2.1.2 Agricultural use	x			
1.2.2.1.3 Domestic use	x			
1.2.2.2 Cost restriction				
1.2.2.2.1 Low price of water	x			
1.2.2.2.2 High installation cost	x			
1.2.2.2.3 High maintenance cost/maintenance requirements				X
1.2.2.3 Lack of private/public funding				X
1.3 Social unacceptance				
1.3.1 Health risk perception				X
1.3.2 High cost perception	x			
1.3.3 Behavioralrequirements	x			
1.3.4 Childrensurveillance	x			
1.3.5 Fair distribution of treated water	x			
1.3.6 Perception of effectiveness	x			
1.4 Governance				
1.4.1 Lack of coordination	x			
1.4.2 Non-technical knowledge	x			

Tab. 16.1. Questionario sui rischi percepiti non tecnici.

16.4.2 Limiti tecnici

I limiti tecnici presentano indubbiamente più criticità riguardo il rischio di fallimento del sistema (Tab. 16.2). Questi limiti riguardano la possibilità dei danni alla struttura, il rischio di non raggiungere le soglie prefissate di acqua immagazzinata, la scarsa qualità dell'acqua immagazzinata e altri elementi specifici.

Riguardo la possibilità del fallimento per danni strutturali, va riportato come l'area è stata catalogata, nei Piani di Assetto Idrogeologico ai sensi del D.Lgs 49/2010 (che recepisce la Direttiva Acque 2007/60/CE) come zona ad elevato rischio di alluvione. L'efficienza dei sistemi di ricarica controllata tramite bacino d'infiltrazione può risultare sensibile ad eventi alluvionali, i quali potrebbero portare ulteriore sedimento della vasca, mentre il sistema di derivazione delle portate, la sonda multiparametrica del monitoraggio di allerta ed altri sensori del monitoraggio *post-operam* saranno posti in modo da resistere ad eventi di inondazione. Si deve però tener conto come questi problemi siano facilmente rimediabili o attenuabili, senza esborsi economici particolarmente esosi. La conformazione dell'area, pianeggiante e molto vicina al corpo idrico superficiale donatore, rende non rilevanti i rischi di fallimento a causa di stabilità di pendio e di rottura di condutture.

Riguardo il rischio di non raggiungere le soglie prefissate di acqua immagazzinata (circa 360000 m^3 in 210 giorni, su un massimo ipotizzato di 900000 m^3), la letteratura maturata dall'esperienza degli altri sistemi di ricarica con uso di vasche d'infiltrazione riporta come uno degli eventi con maggiori probabiltà di guasto sia l'intasamento dei pori. Al preciso scopo di limitare questa problematica, il sistema prevede una vasca di sedimentazione a monte della vasca d'infiltrazione, assieme alla rimozione dei sedimenti, la ripulitura dalla vegetazione e il rippaggio del fondo delle vasche durante i periodi di inattività. Questa manutenzione limiterà considerevolmente il rischio di clogging fisico (particolato fine), biologico (batteri e biofilm) e della compattazione dello strato insaturo. Mantenendo la manutenzione del sistema, il rischio legato a queste problematiche può essere mantenuto basso. La qualità dell'acqua infiltrata, stando i monitoraggi dell'ARPA e *ante-operam*, risulta un rischio basso di fallimento del sistema, grazie anche all'assenza di centri urbani e/o industrie a monte dell'impianto. Va considerato, a scopo precauzionale, il rischio di possibile mobilizzazione dell'arsenico laddove presente, ma si deve ricordare come il maggior numero di stazioni di monitoraggio *post-operam* permetterà di controllare efficacemente le eventuali variazioni di concentrazione di As nelle acque dell'acquifero. Questo permetterà di individuare anche l'eventuale produzione di metaboliti, così come la presenza di composti organici emergenti, quali i fitofarmaci nelle acque. Anche riguardo i nuovi inquinanti emergenti, il sistema più che un rischio può essere considerato come un sistema avanzato di monitoraggio dell'acquifero. Un rischio di fallimento a causa di anni particolarmente siccitosi, come si è rivelato il 2016-2017, può essere considerato basso: il sistema permetterebbe comunque un'azione, sebbene limitata, di incremento delle riserve immagazzinate, a spese dei picchi di piena

che verrebbero altrimenti dispersi in mare. Inoltre, per la caratteristica stessa dell'immagazzinamento negli acquiferi rispetto ai corpi idrici superficiali, i maggiori volumi immagazzinati negli anni più piovosi forniranno una riserva per i periodi più siccitosi. Proprio a fronte della prevista variabilità annuale delle piogge, il volume immagazzinabile dal sistema è considerato molto variabile: fra 360000 e 1800000 m^3 l'anno.

	RISK PERCEPTION			
OPERATIONAL PROCESSES	NO RISK	HIGH	MEDIUM	LOW
2. TECHNICAL CONSTRAINTS				
2.1 StructuralDamages				
2.1.1 Flooding			x	
2.1.2 Natural hazards (e.g. earthquake)	x			
2.1.3 Terrorismactivities/Vandalism				X
2.1.4 Civil work failures				
2.1.4.1 Slope stability				X
2.1.4.2 Pipe breakage				X
2.1.4.3 Others	x			
2.1.5 Aquifer dissolution (e.g. in karstic aquifer)	x			
2.2 Notenough water recharged				
2.2.1 Low quality water				
2.2.1.1 Sanitary/biological restrictions (e.g. due the pathogens)				X
2.2.1.2 Physicalrestrictions				
2.2.1.2.1 Turbidity/particles				X
2.2.1.3 Chemicalrestrictions				
2.2.1.3.1 Metals (e.g. arsenic, manganese)			x	
2.2.1.3.2 Salinity and sodicity	x			
2.2.1.3.3 Nutrients (nitrogen, phosphorous)				X
2.2.1.3.4 Organic chemicals (pollutants, EOCs)				X
2.2.1.3.5 Radionuclides	x			
2.2.2 Water scarcity				
2.2.2.1 Climate				
2.2.2.1.1 Droughts and Rainfall event periodicity				X
2.2.2.2 Waste water treatment plant failure	x			
2.2.2.3 Desalinationplantfailure	x			
2.2.2.4 River regulation	x			
2.2.3 Clogging				
2.2.3.1 Physicalclogging				
2.2.3.1.1 Failure deposition pond (particles from diverted water)				
2.2.3.1.1.1 Pipe filterfails	x			
2.2.3.1.1.2 Residence time	x			
2.2.3.1.1.3. Source fine particles (generation inside MAR facility)				X
2.2.3.1.3 Transport sedimentation (erosion or deposition from recharge pond)				
2.2.3.1.3.1 Deposition	x			
2.2.3.1.3.2 Erosion	x			
2.2.3.2 Bioclogging				X
2.2.3.3 Chemicalclogging				
2.2.3.3.1 Evaporation (excesses)				X

2.2.3.3.2 Water mixtures				X
2.2.3.3.3 Microbialpopulationcatalysis				X
2.2.3.4 Compaction				X
2.2.3.5 Generation of gas (e.g. bubble formation)				
2.2.3.5.1 PhysicalMotives				X
2.2.3.5.2 Bacterialprocesses				X
2.2.3.5.3 Inappropriate design				X
2.3 Unacceptable quality of water at sensitive location				
2.3.1 Inefficientnaturalattenuation				
2.3.1.1 Organicmatter				X
2.3.1.2 Emergingorganiccompounds				X
2.3.1.3 Nutrients				X
2.3.2 Generation of metabolites				
2.3.2.1 Nitrogencycle (NO2-, N2O…)				X
2.3.2.2 Emergingorganiccompounds				X
2.3.2.3 Othernutrientcycles (H2S)				X
2.3.3 Mobilization				
2.3.3.1 Metals		x		
2.4 Specific targets (it is important to you?)				
2.4.1 Seawaterbarriers	x			
2.4.2 Protected water body	x			
2.4.3 Water levels				
2.4.3.1 River			x	
2.4.3.2 Spring	x			
2.4.3.3 Wetland	x			
2.4.3.4 Grounndwater				X

Tab. 16.2. Questionario sui rischi tecnici percepiti.

16.5 Risultati

I risultati dell'analisi di rischio ottenuti per mezzo dell'applicazione dello strumento dedicato MAR-RISKAPP mostrano un basso rischio totale di fallimento del sistema di ricarica pari a 0.18 (visibile in Elaborato A - Albero dei fallimenti). Questo valore è legato alla presenza di numerosi elementi di rischio dovuti ai molteplici aspetti considerati nell'analisi. I risultati mostrano come la possibilità di fallimento dovuta dall'insieme dei limiti non tecnici (0.11) costituisca il rischio principale rispetto al rischio dato dai limiti tecnici (0.09). Riguardo i primi, i limiti normativi sono le forzanti più importanti, con una probabilità di fallimento di 0.04. I limiti economici e l'accettabilità sociale comportano una possibilità di fallimento di 0.06 e 0.01, mentre la gestione, considerando il contratto di bacino, non appare un rischio significativo. Riguardo i limiti tecnici, il rischio che più contribuisce alla possibilità di fallimento del sistema è il rischio di incapacità di assicurare sufficiente acqua (0.06), in particolare a causa di eventi di clogging (0.03), più che la qualità dell'acqua (0.01) o i rischi di siccità (0.01). La Tab. 16.3. indica i valori di probabilità di rischio fallimento, rispetto alle percezioni.

HIGH RISK	CALCULTED RISK
2.3.3.1 Metals	1.00E-02
MEDIUM RISK	
2.1.1 Flooding	1.00E-02
2.2.1.3.1 Metals (e.g. arsenic, manganese)	1.00E-02
2.4.3.1 River	1.00E-03
LOW RISK	
1.2.2.3 Lack of private/public funding	5.00E-02
1.1.1.2 National	2.00E-02
1.1.2.1 Health legislation	2.00E-02
2.2.3.1.2 Source fine particles (generation inside MAR facility)	2.00E-02
1.2.2.2.3 High maintenance cost/maintenance requirements	1.00E-02
2.2.3.2 Bioclogging	1.00E-02
1.3.1 Health risk perception	1.00E-02
2.2.2.1.1 Droughts and Rainfall event periodicity	1.00E-02
2.3.1.1 Organic matter	1.00E-03
2.1.4.1 Slope stability	1.00E-03
2.2.3.3.3 Microbial population catalysis	1.00E-03
2.2.3.3.2 Water mixtures	1.00E-03
2.3.1.3 Nutrients	1.00E-03
2.2.3.3.1 Evaporation (excess)	1.00E-03
2.2.3.4 Compaction	1.00E-03
2.3.2.2 Emerging organic compounds	1.00E-03
2.1.4.2 Pipe breakage	1.00E-03
2.3.2.1 Nitrogen cycle (NO2-, N2O…)	1.00E-03
2.1.3 Terrorism activities/Vandalism	1.00E-03
2.2.2.4 River regulation	1.00E-03
2.3.1.2 Emerging organic compounds	1.00E-03
2.2.1.3.3 Nutrients (nitrogen, phosphorous)	1.00E-03
2.2.3.5.2 Bacterial processes	1.00E-03
2.2.1.2.1 Turbidity/particles	1.00E-03
2.4.3.4 Groundwater	1.00E-03
2.2.1.1 Sanitary/biological restrictions (e.g. due the pathogens)	1.00E-03
2.1.4.3 Others	1.00E-03
2.3.2.3 Other nutrient cycles (H2S)	1.00E-03
2.2.1.3.4 Organic chemicals (pollutants, EOCs)	1.00E-03
2.2.3.5.1 Physical Motives	1.00E-04
2.2.3.5.3 Inappropriate design	1.00E-04

Tab. 16.3. Tabella comprensiva fra la percezione del rischio ed i valori calcolati.

17. PIANO DI GESTIONE E MANUTENZIONE

La gestione dell'impianto d'infiltrazione riguarda il controllo delle portate immesse nel bacino di infiltrazione in funzione di quelle fluenti in alveo e della qualità chimico-fisica delle acque superficiali, ed il monitoraggio dell'andamento del campo di moto piezometrico unitamente al monitoraggio della qualità chimica delle acque sotterranee. Questa parte circa il Piano di Monitoraggio e controllo (Allegato 1 parte C, punto 2) è dettagliata nella successiva Sezione 18.

Il piano di gestione e manutenzione annuale prevede il controllo di tutti gli elementi legati alla gestione ed al monitoraggio dell'impianto. In particolare, saranno oggetto di manutenzione:

- il sistema elettrico;
- la pompa utilizzata per il sollevamento delle acque superficiali nel bacino di infiltrazione;
- le sonde multi-parametriche ed i sensori posizionati nei piezometri (in modo da controllarne il corretto funzionamento, la taratura e la presenza di eventuali danneggiamenti o atti vandalici).

Per mantenere la funzionalità dell'impianto in termini di infiltrazione, verrà rimosso il materiale fine depositato nella vasca di infiltrazione non vegetata, insieme alla eventuale vegetazione. Tale operazione, finalizzata alla risolvere il problema dell'intasamento dei pori e ripristinare la permeabilità verticale nello strato insaturo superficiale, verrà svolta congiuntamente ad una operazione di aratura superficiale.

Verrà inoltre svolta la pulizia dell'area per assicurare un facile accesso all'impianto. Responsabili della manutenzione e funzionalità dell'impianto durante il periodo di durata del progetto LIFE REWAT sono il Consorzio di Bonifica Toscana Costa e ASA spa, coadiuvati dalla Scuola Superiore Sant'Anna per quanto riguarda le attività di monitoraggio, così come previsto nel progetto LIFE REWAT. IN tale contesto, verrà definito un organigramma e formato il personale per la gestione e la manutenzione dell'impianto come previsto nel progetto EU LIFE REWAT.

18. PIANO DI MONITORAGGIO E CONTROLLO

La preparazione del presente progetto esecutivo ha previsto il monitoraggio *ante-operam*, che proseguirà nella fase di realizzazione, e sarà seguito una volta che l'opera sarà realizzata, collaudata ed in funzione da un sistema di monitoraggio *post-operam* e di prima allerta basato su:

- raccolta di informazioni puntuali a cadenza mensile sui livelli piezometrici e delle acque superficiali e sulla qualità delle acque superficiali/sotterranee;
- informazioni rilevate con sistema di monitoraggio ad alta frequenza con sonde e sensori multiparametrici atte a rilevare variazioni di variabili chimico-fisiche rappresentative, con teletrasmissione del dato rilevato.

L'insieme di sonde multiparametriche e sensori, congiuntamente ad hardware e software e sistemi di teletrasmissione costituirà il sistema di monitoraggio di prima allerta.

Il sistema unitamente al piano di monitoraggio previsto per l'impianto pilota di ricarica delle falde in condizioni controllate in località Forni è finalizzato (come richiesto nell'Allegato 1 del DM 100/2016 parte B, sezione 2 punto c5/6) a:

- completare la caratterizzazione del sito;
- monitorare l'efficacia dell'intervento e rilevare eventuali effetti indesiderati;
- mettere in opera un sistema di prima allerta atto a interrompere la derivazione in caso di transito di sostanze indesiderate o modificazioni del corpo idrico donatore (es. deflussi inferiori al minimo deflusso vitale).

Il sistema di monitoraggio e di controllo del funzionamento dell'impianto di ricarica in condizioni controllate sarà costituito da:

- sistema di monitoraggio e controllo dell'opera di derivazione delle acque dal Fiume Cornia, posto al punto di derivazione. Questo sistema, appositamente progettato, farà si che il sollevamento delle acque dal Fiume Cornia verso il bacino di ricarica sia "comandato" dalla sonda multi-parametrica Spectrolyser per l'analisi della qualità delle acque fluenti nel Fiume Cornia. La sonda multiparametrica Spectrolyser determinerà il funzionamento dell'opera di presa (e quindi della pompa) o meno in base al superamento di soglie che verranno predefinite in fase di realizzazione dell'intervento in accordo con gli enti competenti (ARPAT/Regione Toscana, ASL);
- una rete di piezometri con punti a monte ed a valle dell'impianto di ricarica a diversa profondità per permettere il monitoraggio discreto (tramite operatore) ed in continuo (attraverso sei sensori) e teletrasmesso dell'andamento del livello e di una serie di variabili chimico-fisiche delle acqua sotterranee;
- sensori multi-parametrici da mettere in opera nei piezometri di cui al punto precedente per il monitoraggio dell'andamento del livello e della qualità delle acqua sotterranee;

- sistema di teletrasmissione e sistema software per l'acquisizione e l'analisi dei dati acquisiti dalla sonda Spectrolyser per le acque superficiali e da sei sensori multi-parametrici per le acque sotterranee.

L'obiettivo del sistema di monitoraggio è quello di garantire l'efficacia dell'opera e una adeguata protezione della salute umana e dell'ambiente.

A tale proposito, il Comune di Suvereto, a seguito di contributo dedicato da parte di Regione Toscana (Decreto Dirigenziale n. 12753 del 18.11.2016), sta collaborando alla realizzazione di tale sistema di monitoraggio attraverso:

- la realizzazione dei piezometri;
- acquisto e installazione di sonda spettrometrica;
- sistema di apertura chiusura del sistema di derivazione delle acque superficiali basato sui parametri acquisiti dalla sonda spettrometrica compreso sistema di trasmissione dei dati.

L'Istituto di Scienze della Vita (Scuola Superiore Sant'Anna) si occuperà di mettere in opera una ulteriore sonda multi-parametrica (parametri acquisibili: livello, temperatura, conducibilità elettrica, pH, ossigeno disciolto, potenziale redox) ed almeno sei sensori per la determinazione di livello, temperatura e conducibilità elettrica da installare in altrettanti punti per il monitoraggio in continuo delle acque sotterranee.

Terminate le attività del progetto EU LIFE REWAT il sistema potrà essere reso parte della rete regionale di monitoraggio delle acque (del. 847 14/10/2013) secondo modalità concordate tra Regione Toscana e Comune di Suvereto.

Il sistema di monitoraggio utilizzato nella fase *ante-operam* per la preparazione del presente progetto è già stato ampiamente descritto nelle Sezioni A e B. Di seguito viene riportata la descrizione del sistema di monitoraggio che verrà utilizzato nella fase di operatività dell'impianto.

18.1 Sistema di monitoraggio *post-operam*

Il sistema di monitoraggio *post-operam* è finalizzato sia a valutare l'efficacia dell'intervento, sia a individuare un eventuale deterioramento dello stato del copro idrico ricevente e/o del corpo idrico donatore. La configurazione di detto sistema di monitoraggio prevede:

- la determinazione del livello idrometrico del corpo idrico superficiale e quindi, sulla base di una scala di deflusso opportunatamente tarata, delle portate fluviali;
- dei livelli piezometrici in un numero adeguato di punti a monte ed a valle dell'impianto di ricarica;
- la determinazione di parametri chimici e fisici atti a definire lo stato qualitativo dei corpi idrici coinvolti.

Per il monitoraggio della qualità delle acque superficiali a scala temporale mensile, verrà mantenuto il presente punto REWCOR1, utilizzato nella fase *ante-operam*. Tale punto verrà inoltre attrezzato per la determinazione del livello del corso d'acqua con

registrazione dei dati ad alta frequenza (minino 1 dato/ora). Verranno inoltre ripetuti i rilevamenti correntometrici a diverse sezioni del Fiume Cornia, mantenendo in via prioritaria le sezioni fino ad oggi investigate. Il protocollo relativo al monitoraggio della qualità delle acque superficiali sarà lo stesso utilizzato nella fase *ante-operam*, fatte salve diverse disposizioni (i.e. determinazione o meno di specifici analiti) in accordo con gli enti di controllo, da definirsi sulla base delle risultanze del monitoraggio in fase *ante-operam*.

Per il monitoraggio delle acque sotterranee, oltre ai punti esistenti monitorati nella fase *ante-operam*, è in corso di realizzazione (operatività prevista per fine agosto 2017) una rete di 18 piezometri. Durante la realizzazione di tali piezometri saranno eseguiti n. 1 carotaggio a 6 m ed uno a 12 m (da effettuarsi nei punti dove saranno realizzati i piezometri) di profondità. La posizione geografica dei punti di monitoraggio è presentata in Fig. 18.1. All'interno di ciascun foro verrà inserita una canna piezometrica di diametro interno di 2" in PVC. Le fenestrature saranno eseguite nell'ultimo metro per una lunghezza di 1m, tranne che nei piezometri di profondità 12 m che dovranno avere fenestratura pari a 2 m. Il drenaggio sarà realizzato negli ultimi 3 metri, con ghiaietto siliceo di fiume calibrato di diametro 4-6 mm. Il tratto superiore, fino ad 1 m dal piano campagna, sarà sigillato con l'impiego di sferette "pellets" di argilla disidratata di tipo montmorillonitica tipo "compactonict" o "Laviostop". Le sferette di argilla saranno messe in opera mediante i tubicini di immissione. L'ultimo tratto, fino al piano di campagna, di spessore 1 m, sarà cementato con boiacca di cemento con rapporto acqua/cemento 0,5.
Al termine delle attività sopra indicate ogni piezometro sarà spurgato con aria compressa in modo da assicurare l'asportazione completa di materiale fine presente all'interno del piezometro a causa delle lavorazioni. Ogni canna piezometrica sarà dotata di apposito tappo a vite o ad incastro.
Su tutti i punti in questione si prevede il monitoraggio con cadenza almeno mensile dei livelli piezometrici. Per quanto riguarda il monitoraggio della qualità delle acque sotterranee, verranno mantenuti i piezometri REW5 e REW6 ed i monitoraggi ai pozzi SU01 e SU08. A questi verrà aggiunto un set di ulteriori quattro punti, da definirsi nelle fasi iniziali della ricarica, in dipendenza degli innalzamenti registrati, in accordo con gli enti di controllo. Il monitoraggio avrà inizialmente cadenza mensile, sino all'osservazione di fenomeni di stazionarietà, invarianza dei parametri chimico-fisici. In tal caso, in accordo con gli enti di controllo, potrà essere ridotto il numero dei parametri o diminuita la frequenza di campionamento, ad es. a bimestrale. Il protocollo relativo al monitoraggio della qualità delle acque sotterranee sarà lo stesso utilizzato nella fase *ante-operam*, fatte salve diverse disposizioni (i.e. determinazione o meno di specifici analiti) in accordo con gli enti di controllo, da definirsi sulla base delle risultanze del monitoraggio in fase *ante-operam*.

Le risultanze di detti monitoraggi saranno trasmesse con frequenza almeno annuale all'Autorità concedente l'autorizzazione. I dati del monitoraggio saranno inoltre trasmessi ad ARPAT ed alla locale ASL.

Fig. 18.1. Punti di monitoraggio piezometrico previsti per il sistema di monitoraggio *post-operam*.

18.2 Sistema di monitoraggio prima allerta

Il sistema di monitoraggio di prima allerta sarà composto da una unità di controllo ed un'interfaccia per l'apertura/chiusura della derivazione. L'unità di controllo comprende un sistema di acquisizione dati basato su architettura PC sul quale sarà installato il software dedicato all'acquisizione dei dati. Il sistema di acquisizione è connesso tramite bus dati RS485 al modulo di interfaccia Digital I/O che attiva e disattiva il sistema di pompaggio.

L'unità di controllo sarà alloggiata in un box di opportune dimensioni e grado di protezione IP67, corredato di staffe per l'aggancio al palo di supporto. Su di un lato del box saranno installati i connettori per il collegamento con le sonde, le antenne ed il cavo di alimentazione. Le sonde esterne saranno collegate all'unità di controllo tramite cavo, dove possibile, oppure tramite connessione wireless.

Per il monitoraggio della qualità delle acque del Fiume Cornia presso il punto di derivazione delle acque superficiali da derivare verso l'impianto pilota di ricarica in condizioni controllate verrà installata una sonda SCAN Spectrolyser in un pozzetto in fregio al Fiume Cornia. detta sonda acquisirà una serie di parametri, tra cui la firma spettrale delle acque del Fiume Cormia, con frequenza di acquisizione variabile da 15' a un'ora. I dati saranno essere immagazzinati in un datalogger e da questo trasferiti ad es. una volta al giorno ad un server. I parametri misurati della sonda Spectrolyser saranno acquisiti con una frequenza maggiore rispetto ai parametri misurati dalle altre sonde. La frequenza di acquisizione dati sarà comunque impostabile tramite il software di acquisizione.

La sonda Spectrolyser sarà collegata tramite cavo all'unità di controllo. Oltre alla sonda Spectrolyser, l'unità di controllo acquisirà anche i dati provenienti dalla sonda multiparametrica e dai sensori installati nei 6 piezometri di controllo. Sulla base dei dati forniti dalla sonda Spectrolyser il sistema permetterà l'accensione o meno del sistema di pompaggio posto presso l'impianto di ricarica della falda. Il software consentirà di configurare le soglie che attivano o disattivano il sistema di pompaggio.

Tutti i dati verranno acquisiti dal sistema di controllo e salvati su di una memoria interna rimovibile a stato solido. Per la funzionalità dell'impianto verrà preparato e siglato un protocollo nel quale verranno inoltre riportate le soglie dei parametri spia che garantiranno l'accensione della derivazione o meno.

Secondo lo schema di funzionamento riportato in Fig. 18.2, il sistema di monitoraggio di prima allerta si compone di: sistema di alimentazione, sistema di acquisizione e controllo, sistema di telemetria.

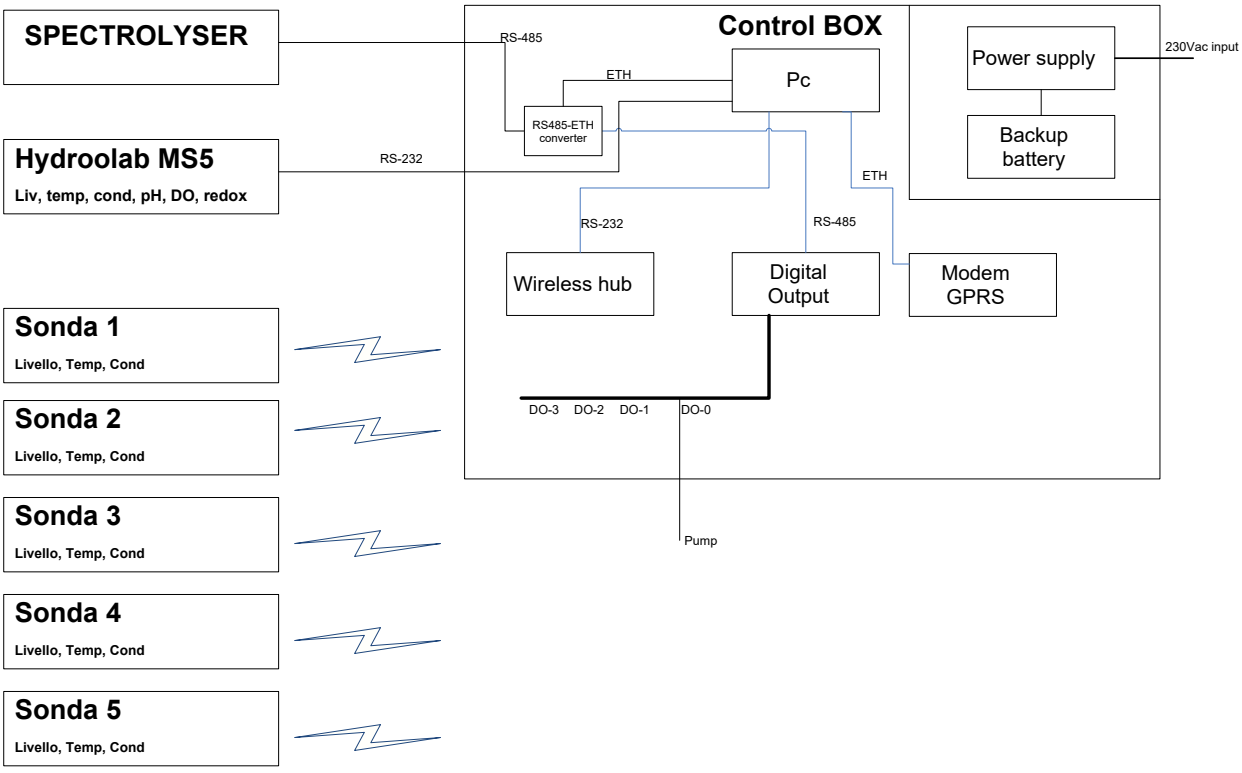


Fig. 18.2. Configurazione dello schema di prima allerta.

L'unità di controllo sarà alimentata da un alimentatore switching con uscita in bassa tensione 12-24 Vdc con batteria tampone a 12V. Questo consentirà di mantenere in funzione il sistema, anche per diverse ore, in caso di assenza dell' alimentazione di rete.

Il sistema di acquisizione dati basato su architettura PC, con installata una memoria a stato solido di capacità maggiore di 2 Gb, sarà collegato con le sonde installate nell'area attraverso bus dati RS485, seriale RS232 o collegamento wireless. Il software dedicato installato sul PC permetterà la visualizzazione dei dati attraverso un display grafico retroilluminato.

I parametri del software di acquisizione saranno configurabili dall'utente che potrà impostare le soglie di accensione spegnimento del sistema di pompaggio sulla base dei dati acquisiti. Il sistema di telemetria sarà costituito da un modem GPRS che, collegato al sistema di acquisizione tramite interfaccia LAN, consentirà il download automatico dei dati da remoto. Sempre da remoto, sarà inoltre possibile visualizzare lo stato del sistema e configurare i parametri di acquisizione. I parametri di qualità da monitorare in continuo saranno concordati anche con l'Agenzia Regionale di Protezione Ambientale della Regione Toscana, ma in prima analisi possono essere identificati in un set comprendente pH, ossigeno disciolto, potenziale redox, conducibilità elettrica, temperatura e torbidità.

19. PIANO DI EMERGENZA

Il piano d'emergenza si basa sull'assicurare che il sistema di ricarica controllata della falda non sia veicolo di contaminazione dell'acquifero e che il prelievo di acqua dal Fiume Cornia non porti ad una deflusso superficiale in alveo inferiore al deflusso minimo vitale.

In generale, l'impianto non presenta una particolare forma di rischio per la qualità chimico fisica delle acque sotterranee, realizzandosi la ricarica con acque, che naturalmente ravvenano la falda.

La sonda Spectrolyser in continuo, utilizzata durante il monitoraggio *post-operam*, permetterà di individuare la presenza di contaminanti in concentrazioni superiori ai valori soglia prefissati. In tal caso, il piano di emergenza prevede l'immediato termine della derivazione delle portate dall'alveo fluviale alla vasca d'infiltrazione. Questo escluderà la contaminazione diretta della vasca d'infiltrazione ad opera della stazione di sollevamento, ma, si rileva, non si potrà evitare che l'acquifero venga interessato dalla ricarica naturale del Fiume Cornia.

Nel caso di contaminazioni causate da atti vandalici o similari, il monitoraggio discreto *post-operam* ed in continuo permetterà di individuare concentrazioni e distribuzioni di eventuali contaminanti nella falda. In questo caso, il piano d'emergenza prevede l'uso delle stazioni di monitoraggio REW5, REW6 (*ante-operam*), e dei piezometri appositamente perforati in funzione di pozzi barriera. In caso di valori anomali dei parametri determinati, si procederà nel più breve tempo possibile ad un monitoraggio della matrice interessata si da capire se si tratta di un falso positivo oppure della presenza di una sostanza indesiderata.

In caso di contaminazione del substrato della vasca, la sua ridotta dimensione permetterà anche la rimozione degli strati per trattamenti in situ all'interno dell'area del sito, o la sua sostituzione

Qualora il Fiume Cornia non abbia portate sufficienti ad assicurare il deflusso minimo vitale a valle della derivazione delle portate, la pompa verrà disattivata dal sistema di controllo e l'impianto smetterà di funzionare.

Bibliografia

ASTM Standard D3385-09, (2009) - Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer.

Barazzuoli P., Bouzelboudjen M., Cucini S., Kiraly L., Menicori P., Salleolini M., (2008). Olocenic alluvial aquifer of the River Cornia coastal plain (southern Tuscany, Italy): database design for groundwater management. Environmental Geology, 39, 123-143.

Bartolini C., Palla B., Pranzini E. (1989) "Studi di geomorfologia costiera: il ruolo della subsidenza nell'erosione litoranea della pianura del Fiume Cornia". Boll. Soc. Geol. It. 108, 635-647.

Boschian G., Bossio A., Dall'Antonia B. & Mazzanti R., (2006). Il Quaternario della Toscana Costiera. Studi Costieri,12..

Bredford T., Cooke R., (2003). Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods. Cambridge University Press, Uk.

CGT, (2011). Indagini geoelettriche finalizzate alla ricerca di acquiferi alluvionali nell'alta pianura del Fiume Cornia, Località "I Forni – San Lorenzo", Comune di Suvereto (Li). Relazione per ASA S.p.A. – Livorno.

De Barros F.P.J., Bolster D., Sanchez-Vila X., Nowak W., (2011). A divide and conquer approach to cope with uncertainty, human health risk, and decision making in contaminant hydrology. Water resources research, 47, W05508, doi:10.1029/2010WR009954.

Fetter, C.W., (2001). Applied Hydrogeology; 4th edition. Prentice Hall, New Jersey.

Freeze A.R., Cherry J.A., (1974). Groundwater. Prentice Hall, New Jersey.

GetasPetrogeo, (2004). Campagne di misura di deflusso del Fiume Cornia (2002-2003). Presentazione Roberto Ghezzi. Documento interno Consorzio di Bonifica Toscana Costa (ex- Val di Cornia).

GetasPetrogeo, (1999) – Indagine sulle lesioni dei fabbricati nell'area di Casalpiano – Rapporto geologico-tecnico per CIGRI –Venturina (LI).

Ghezzi G, Ghezzi R, Muti A, (1993). Studio idrogeologico della Pianura di Piombino (Pianura del Fiume Cornia e Terrazzo S.Vincenzo-Palmentello). Quad. Mus. Stor. Nat. di Livorno, 13 (suppl 2), 213–275 (with hydrogeological map at the 1 : 25000 scale).

Lazzarotto A., Mazzanti R. & Salvatorini G., (1969). Conglomerati di Montebamboli. Studi illustrativi della C.G.I., II edizione, 3, 1-15.

Fatehnia M. (2013). Rational Method for In-Situ Prediction of the Vertical Saturated Hydraulic Conductivity of Soils– STGEC.

Pennisi M., Bianchini G., Kloppmann W., Muti A., (2009). Chemical and isotopic (B, Sr) composition of alluvial sediments as archive of a past hydrothermal outflow. Chemical Geology 266: 114–125.

Regione Toscana - Dipartimento delle Politiche Territoriali e Ambientali, (2003). Studio conoscitivo del contesto idrogeologico della Val di Cornia di supporto alla pianificazione in materia di risorsa idrica e di tutela delle acque. Relazione finale. A cura di GetasPetrogeo.

REGIONE TOSCANA – DIREZIONE GENERALE DELLE POLITICHE TERRITORIALI E AMBIENTALI – SERVIZIO GEOLOGICOREGIONALE, (2006). Carta Geologica della Regione Toscana alla scala 1:10.000.

REGIONE TOSCANA - DIREZIONE GENERALE DELLE POLITICHE TERRITORIALI E AMBIENTALI, (2009). Caratterizzazione geologica, idrogeologica e idrogeochimica dei Corpi IdriciSotterranei Significativi della Regione Toscana (CISS) 32CT020 "Acquifero della Pianura del Cornia".

REGIONE TOSCANA - DIREZIONE GENERALE DELLE POLITICHE TERRITORIALI E AMBIENTALI, (2012). Integrazione alla "Caratterizzazione geologica, idrogeologica e idrogeochimica dei Corpi Idrici Significativi della Regione Toscana (CISS)"32CT020 "Corpo Idrico della Pianura del Fiume Cornia" 32CT021 "Corpo Idrico del Terrazzo di San Vincenzo".

Rodrìguez-Escales P., Canelles A., Sanchez-Villa X., Folch A., Fernàndez-Garcia D., Carme Barba, (2016). MARSOL Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. Assessment tool for risk evaluation and potential mitigation activities – The MAR-RISKAPP. Deliverable 16.4. http://www.marsol.eu/35-0-Results.html.

Sanchez-Vila X., Fernàndez-Garcia D., Folch A., Rodrìguez-Escales P., Siirila E., Henri C., Barba C., (2015). MARSOL Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. Methodology for Probabilistic Risk Evaluation Linked to MAR Activities. Deliverable 16.1. http://www.marsol.eu/35-0-Results.html.

Sbrilli L., (2004). Fenomeni diffusi di sinkholes nella pianura del fiume Cornia soggetta a subsidenza. Biblioteca ISPRA.

Sbrilli l., (2002). Correlazioni tra emungimenti di falda e lesioni strutturali su alcuni manufatti della pianura del Fiume Cornia. COMITATO CASE LESIONATE – VENTURINA (LI). Inedito.

Servizio Idrologico Regione Toscana, (2016). http://www.sir.toscana.it/ [ultimo accesso 30 ottobre 2016].

Sistema Informativo Regionale dell'Ambiente della Toscana (SIRA ARPAT), (2017). http://sira.arpat.toscana.it/sira/ [ultimo accesso 31 maggio 2017].

Spitz K., Moreno J., (1996). A practical guide to groundwater and solute transport modeling. John Wiley and sons.

Tartakovsky D.M., (2007). Probabilistic risk analysis in subsurface hydrology. Geophysical Research Letters, 34, L05404, doi:10.1029/2007GL029245.