

**AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME ARNO  
AUTORITÀ IDRICA TOSCANA  
COMUNE DI PRATO  
PROVINCIA DI PRATO  
PUBLIACQUA S.p.a.**

**STUDIO CONOSCITIVO DELL'ACQUIFERO DI PRATO  
INDAGINI IDROGEOLOGICHE E GEOCHIMICO-ISOTOPICHE 2015 - 2016**

**MARZO 2016**

*a cura di*

**West Systems srl (Silvia Angelini, Giovanni Cannata)**

**PIN srl (Claudio Lubello)**

**IGG-CNR (Marco Doveri, Matia Menichini)**

## INDICE

1	PREMESSA .....	2
2	INTRODUZIONE .....	3
3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO .....	5
4	ASPETTI NOTI DI CONTAMINAZIONE DELL'ACQUIFERO PRATESE.....	11
5	INDAGINI SVOLTE NELL'AMBITO DEL PROGETTO .....	17
5.1	CAMPAGNE ESTESE DI MISURA E CAMPIONAMENTO .....	17
5.2	INDAGINI CON PERTURBAZIONE IDRODINAMICA.....	31
6	CONCLUSIONI .....	53
7	BIBLIOGRAFIA.....	57

### 1 PREMESSA

Nel Novembre 2014, con la definitiva messa a punto del modello di flusso in regime transitorio dell'acquifero di Prato, si sono concluse le attività previste all'interno di una Intesa Tecnica tra Autorità di bacino, Provincia di Prato e Ingegnerie Toscane.

La modellazione è stata prodotta per il periodo 2007/2012 e validata per il 2013/2014. La simulazione del flusso, in regime transitorio, è stata implementata per periodi trimestrali, ciò anche in funzione delle informazioni disponibili (in particolare piezometrie).

L'integrazione con aspetti qualitativi prevede l'implementazione di un modulo per il trasporto degli inquinanti. Tale integrazione potrà consentire di predire la concentrazione di un determinato inquinante in un certo punto e in un certo istante. Ciò non solo a fini conoscitivi ma anche e soprattutto per indirizzare le azioni gestionali e di utilizzo idrico sostenibili.

L'Autorità di Bacino del Fiume Arno, L'Autorità Idrica della Toscana, il Comune di Prato e Publiacqua SpA hanno sottoscritto quindi una Convenzione finalizzata all'approfondimento degli aspetti qualitativi dell'acquifero pratese. Tale studio prevede l'utilizzo di prove di campo e di misure chimiche ed isotopiche per la caratterizzazione dell'inquinamento della falda per quanto attiene sia i composti organo - alogenati che dell'azoto.

Lo studio, svolto dalla società WEST SYSTEMS Srl ed il PIN di Prato in collaborazione con l'Istituto di Geoscienze e Georisorse (IGG) del CNR per conto degli Enti che hanno firmato la Convenzione prima richiamata, ha come obiettivo quello di dettagliare lo stato di contaminazione dell'acquifero di Prato fornendo elementi ulteriori per la gestione futura dello stesso.

## 2 INTRODUZIONE

La falda di Prato è interessata da inquinamento diffuso da organo-alogenati e nitrati, che permea settori estesi del corpo idrico. A questo stato di inquinamento di fondo si sovrappongono aree con picchi di concentrazione dovuti a fonti di inquinamento puntuali. Le cause di tali situazioni sono molteplici e difficilmente identificabili con precisione, anche in relazione alla tipologia dei contaminanti ed alla loro specifica modalità di trasporto in un acquifero sotterraneo.

La possibilità di mettere in relazione le caratteristiche qualitative dei componenti principali di campioni di acque e dei contaminanti di interesse con indagini di tipo isotopico, può permettere un ulteriore passo avanti nella conoscenza dell'acquifero e nella caratterizzazione dei fenomeni di inquinamento in atto.

A tale scopo è stato progettato e realizzato un monitoraggio di dettaglio, basato su una serie di campagne di misura, partendo dallo stato di conoscenza attuale con lo scopo di fornire ulteriori elementi in grado di orientare la gestione dell'acquifero.

Per quanto riguarda la caratterizzazione d'insieme, sono state previste due campagne di misura, effettuate in un numero consistente di punti di prelievo, una in condizioni di morbida ed una di magra del corpo idrico. Ciò ha permesso di individuare, fra l'altro, gli attuali hot spot, cioè punti ad alta concentrazione di inquinanti e quindi i pennacchi, cioè le zone di diffusione. Sulla base di questa indagine è stato possibile definire due aree campione su cui programmare e realizzare indagini di dettaglio sotto l'effetto di perturbazioni dello stato idrodinamico della falda (*stress test*). Gli *stress test* hanno come obiettivo quello di individuare relazioni di dipendenza tra il contaminante e gli aspetti idrodinamici in modo da stabilire una migliore comprensione dei meccanismi che regolano le variazioni delle concentrazioni dei contaminanti, verificando anche la possibilità di esportazione dei risultati su aree limitrofe. In funzione delle indicazioni ottenute sui meccanismi in gioco, è quindi possibile intraprendere varie strategie gestionali dell'acquifero, in termini di previsione del fenomeno di inquinamento e protezione delle opere di captazione.

I passaggi fondamentali delle attività, in maggior dettaglio, sono stati i seguenti:

- a) Realizzazione di due campagne generali di monitoraggio dell'acquifero in collaborazione con gli Enti firmatari della Convenzione attraverso misure piezometriche e prelievo di campioni di acqua in piezometri e pozzi distribuiti nell'aerale della falda pratese.
- b) Scelta di due siti su cui effettuare il monitoraggio della qualità delle acque nel corso di "perturbazioni idrodinamiche", in relazione ai risultati conseguiti nelle campagne di monitoraggio e dell'effettiva possibilità tecnica di svolgere dette prove.
- c) Esecuzione di una campagna che preceda le prove di cui al punto precedente (campagna pre-test), in modo da definire il quadro di riferimento di base immediatamente prima della "perturbazione" indotta sull'acquifero. La campagna ha riguardato il rilievo dei livelli piezometrici e il campionamento delle acque al fine della loro caratterizzazione qualitativa.

- d) Esecuzione delle indagini con “perturbazione idrodinamica” nel corso delle quali monitorare livelli idrici e qualità delle acque. A partire da una situazione dinamica (pre-test), corrispondente a quella a regime (in cui i pozzi idropotabili sono mantenuti costantemente attivi), si determina una condizione “statica” o pseudo-statica (nel caso esistano altri pozzi privati attivi al contorno), mantenendo inattivi per alcuni giorni i pozzi idropotabili della zona test. Successivamente il campo pozzi è riportato alle stesse condizioni di attività del pre-test. Il monitoraggio, che prevede misure piezometriche e prelievo di campioni d'acqua con conseguenti analisi chimiche-isotopiche, è caratterizzato da frequenza di misura e prelievo pressoché giornaliera, sia nell’arco di tempo in condizioni pseudo-statiche indotte, sia in quello in cui l’emungimento dei pozzi è ripristinato.

Le analisi chimiche sono state svolte, con eccezione di quelle isotopiche e di alcune misure di controllo svolte in campo, da parte di Publiacqua SpA, che ha inoltre collaborato attivamente, insieme agli altri Enti, all'esecuzione delle campagne di monitoraggio che hanno spesso interessato pozzi gestiti dalla stessa società. Publiacqua ha inoltre fornito i dati storici di qualità delle acque che hanno permesso, insieme ai rilievi ARPAT ed altri studi esistenti, la determinazione dei trend evolutivi dei fenomeni di inquinamento in atto.

Nel seguito si fornirà una descrizione dei risultati conseguiti.

## 3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

L'acquifero di Prato fa parte del Sistema della Piana di Firenze-Prato-Pistoia, inserendosi nel settore centrale della pianura del medio Valdarno. Risulta compreso tra i rilievi dei Monti della Calvana - Monte Morello a Nord e il Monte Albano a Sud, mentre i limiti occidentale ed orientale sono convenzionalmente posti in coincidenza dei confini con i comuni di Pistoia e Firenze (Figura 1).

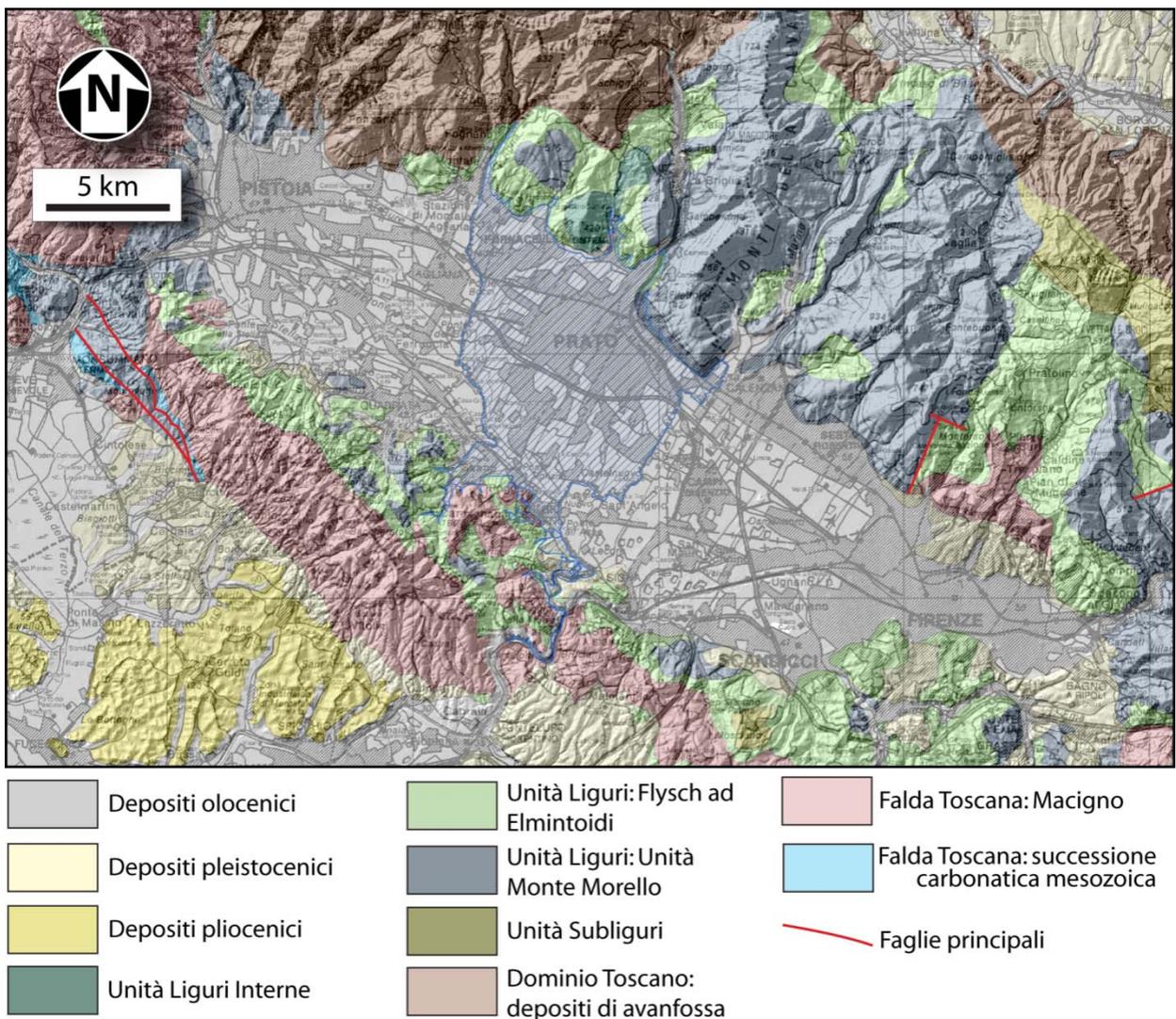


Figura 1 - Schema geologico semplificato dell'area oggetto di studio (da Cerrina Feroni et al., 2010)

La pianura del medio Valdarno rappresenta una depressione lacustre villafranchiana, il cui paleo-invaso, impostato su di un substrato roccioso con formazioni appartenenti al Dominio Ligure s.l. e alla Falda Toscana (Figura 1), è stato colmato da depositi fluvio-lacustri.

Il bacino presenta una profondità massima di circa 500-550 m dal piano campagna nella zona compresa tra Campi Bisenzio e Calenzano (Capecchi et al., 1975), mentre nel settore compreso tra

Prato e Pistoia le profondità raggiungono valori intorno a 400-450 m. I valori di profondità minimi si raggiungono in corrispondenza dell'abitato di Firenze, dove sembrano non superare i 50 m.

Per quanto riguarda la natura del substrato dei depositi fluvio-lacustri questa sembra variare lungo il bacino, riflettendo la natura delle diverse formazioni affioranti lungo i margini della pianura.

In corrispondenza del settore centrale del bacino, nella zona della pianura di Prato, il substrato è costituito da calcari marnosi appartenenti alla Formazione di Monte Morello associati ad elementi del complesso ofiolitico, e da arenarie dell'Unità Cervarola.

La zona pratese del bacino è stata caratterizzata sin dagli stadi iniziali della sua evoluzione da un'area di conoide, principalmente riconducibile al paleo Fiume Bisenzio, con diffusi livelli di ghiaie intercalati alle argille lacustri, con spessori delle ghiaie che diminuiscono passando dal margine settentrionale al centro della pianura.

Come conseguenza dell'evoluzione geologica, da un punto di vista idrogeologico il sottosuolo di Prato corrisponde nell'insieme ad un sistema acquifero multistrato, costituito da un'alternanza fra orizzonti permeabili costituiti dai depositi ghiaiosi, ghiaioso-sabbiosi della successione fluvio-lacustre pleistocenica e dalle ghiaie, sabbie e sabbie limose dei depositi alluvionali olocenici, e livelli impermeabili o scarsamente permeabili, costituiti dai depositi argillosi lacustri e dai limi ed argille di esondazione associati ai sedimenti alluvionali grossolani olocenici.

Come schema generale delle caratteristiche geometriche idrostrutturali dell'acquifero pratese può ritenersi rappresentativo quello elaborato da *Landini et al. (1990)* e qui riportato in Figura 2.

Gli orizzonti acquiferi principali sono rappresentati dai depositi olocenici di conoide alluvionale del Fiume Bisenzio, nonché dai sottostanti depositi plio-pleistocenici del paleo conoide del Bisenzio.

In particolare, sulla base delle informazioni stratigrafiche disponibili, *Cerrina Feroni et al. (2010)* individuano un totale di **6 orizzonti acquiferi** (principalmente rappresentati da ghiaie e ghiaie-sabbiose), tre dei quali (quelli più superficiali) ritenuti di principale importanza in ragione degli spessori e della significativa continuità laterale. Soltanto il più superficiale di questi orizzonti è ritenuto appartenere al ciclo deposizionale fluviale olocenico, mentre i restanti 5 vengono attribuiti al ciclo deposizionale fluvio-lacustre plio-pleistocenico.

Quest'ultimi risultano in buona parte confinati, in quanto intercalati ad acquitardi/acquicludo più o meno continui e rappresentati da depositi argillosi lacustri. Tuttavia su aree significativamente estese, soprattutto in corrispondenza dei margini del bacino (ed in particolare in corrispondenza della porzione apicale degli apparati di conoide e delta-conoide), questi orizzonti tendono a fondersi tra di loro o sono solcati dall'orizzonte acquifero superficiale olocenico, con il quale mostrano continuità idraulica. L'orizzonte acquifero olocenico risulta, a seconda dei settori, non confinato o semi-confinato (nei casi di presenza, al tetto, di spesse coltri di limi di esondazione).

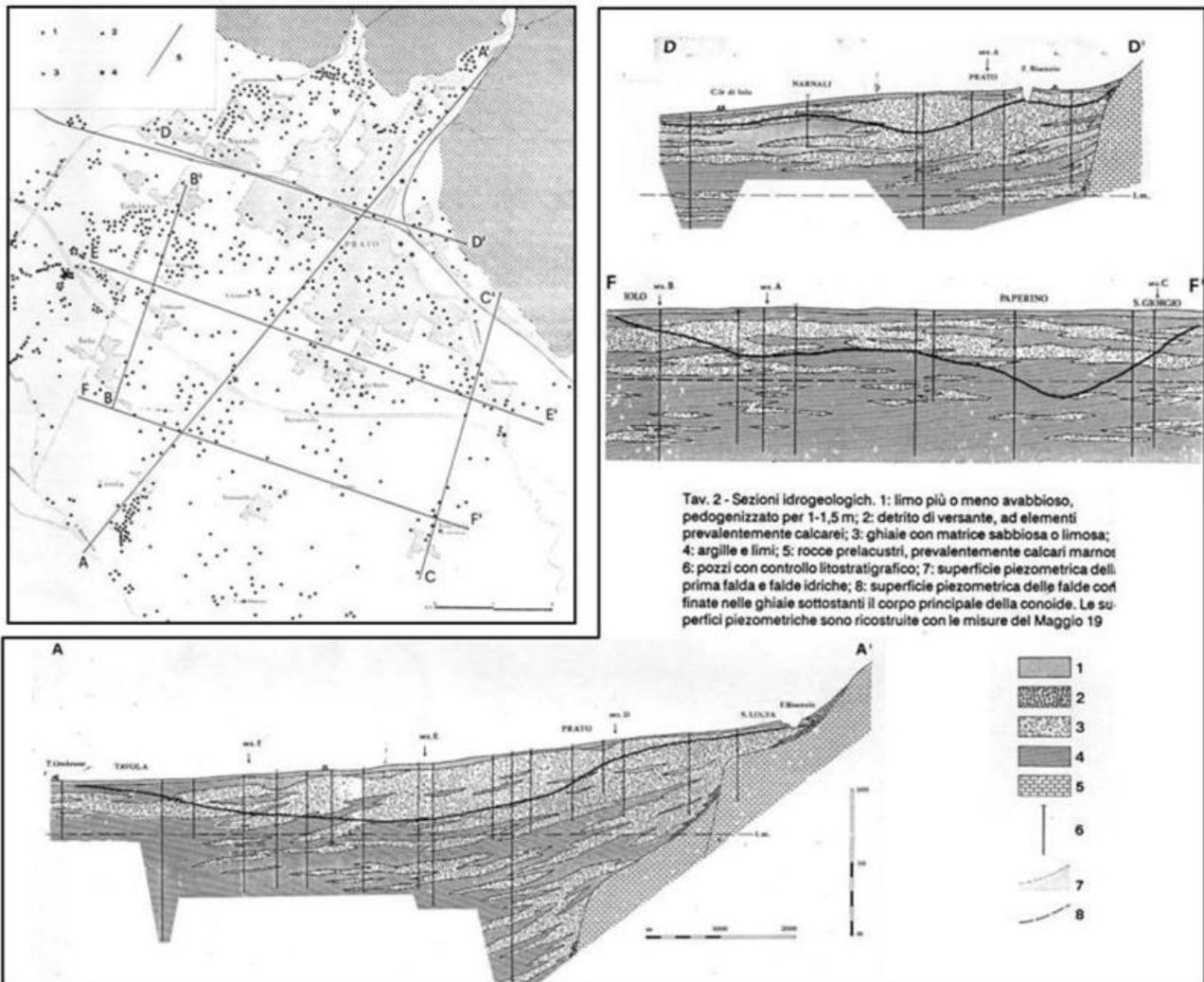


Figura 2 - Sezioni idrogeologiche del sistema acquifero fluvio-lacustre di Prato (estratto dalla Tav. 2 del lavoro di Landini et al., 1990)

I due acquiferi principali pleistocenici (quelli al disotto dell'orizzonte acquifero olocenico superficiale) hanno spessori dell'ordine dei 15-20 metri in corrispondenza del settore assiale del conoide e si assottigliano verso le zone marginali. Nella parte apicale del conoide aumentano i loro spessori, che peraltro vanno a fondersi tra di loro e con l'acquifero superficiale olocenico.

Relativamente alle profondità, nella parte centrale della piana i due acquiferi pleistocenici si attestano sugli intervalli 35-55 e 15-30 m da p.c. rispettivamente.

Al disotto dei tre acquiferi principali qui discussi viene riconosciuto un altro orizzonte di significativa importanza, costituito da ghiaie e ghiaie sabbiose passanti a ghiaie argillose. Lo spessore di questo acquifero, nell'insieme abbastanza isolato dai soprastanti, risulta variabile da pochi metri fino a 10-15 m, ed è rintracciabile alle quote di circa 80 metri nella parte centrale della piana.

A profondità ancora maggiori, vengono infine individuati due ulteriori orizzonti di spessori compresi tra pochi metri ad una decina di metri, la cui continuità è difficilmente documentabile a causa della limitata disponibilità dei stratigrafie profonde.

Da un punto di vista idrodinamico, il sistema nella parte alta della piana (parte apicale del conoide) è di fatto da ritenersi freatico e pressoché monofalda (vista la continuità dei principali orizzonti acquiferi sopra menzionati e la prevalenza delle granulometrie grossolane). Procedendo verso la parte centrale e meridionale dell'area i corpi più permeabili risultano interdigitati a termini a granulometria fine che favoriscono una ripartizione della circolazione idrica su intervalli di profondità differenti. In questi settori la circolazione idrica può risultare anche di tipo confinato, in particolare negli orizzonti permeabili più profondi (profondità superiori ai 50-60 metri), sebbene scambi idrici tra quest'ultimi e la falda libera più superficiale non sono da escludere.

Un aspetto da sottolineare è che anche laddove i vari orizzonti riconosciuti nel sottosuolo di Prato risultano ben separati tra loro ad opera di spessi strati di scarsa permeabilità, talvolta la loro connessione idraulica è localmente determinata dalla presenza di pozzi multi fenestrati. In questi casi, riscontrabili anche per diversi pozzi idropotabili, le acque emunte risultano essere rappresentative di un mescolamento indotto dall'opera di captazione tra acque ospitate in orizzonti acquiferi differenti.

Vari lavori in passato (*Landini et al., 1990; Gargini et al., 1995; Landini, 2005; Doveri, 2006; Gargini et al., 2011*) hanno provveduto alla realizzazione di mappe piezometriche relative alla falda pratese (Figura 3). L'insieme di queste elaborazioni permette di verificare il comportamento della falda in termini di abbassamenti o innalzamenti avvenuti nel tempo.

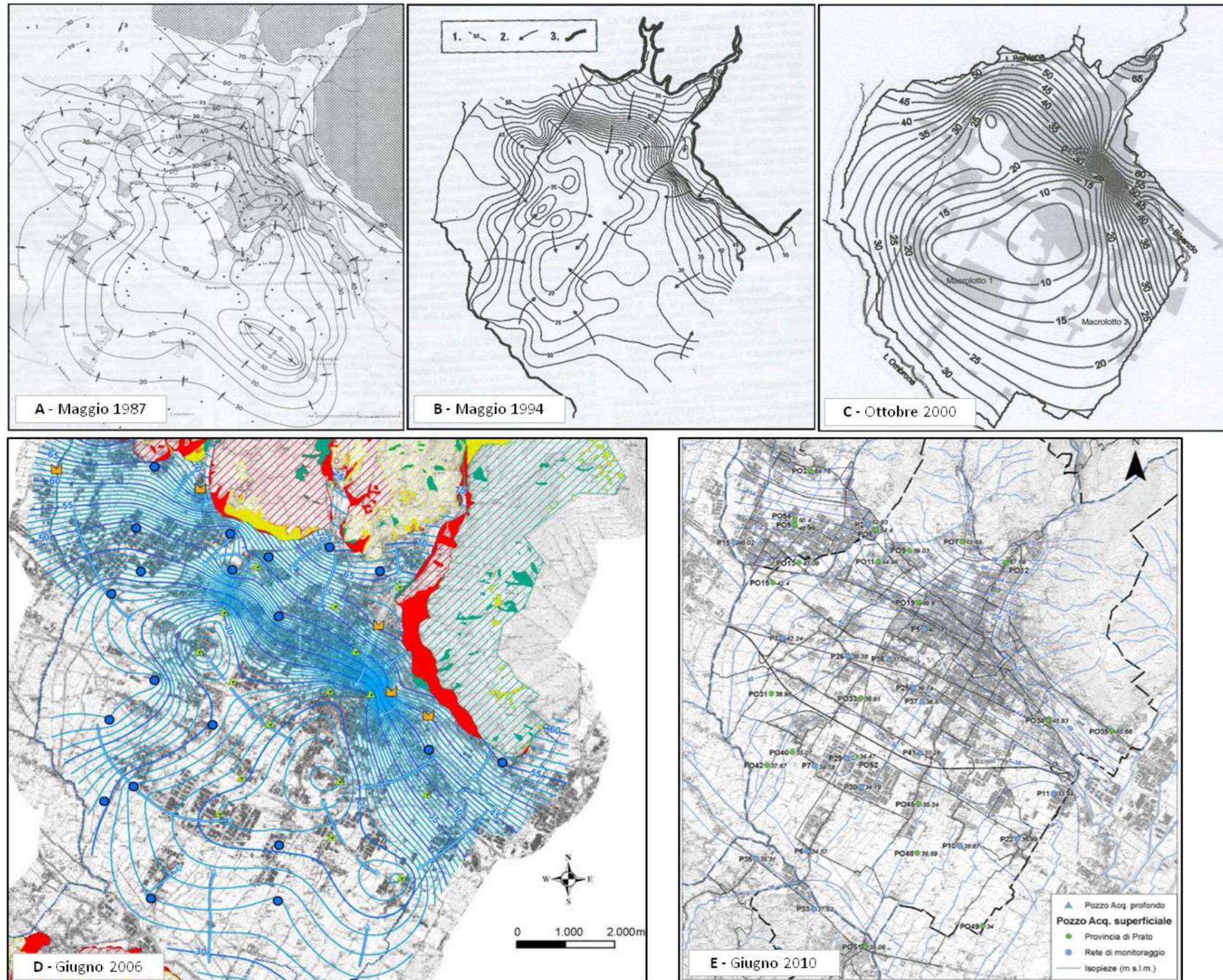


Figura 3 - Elaborazioni piezometriche in periodi passati(A: Landini et al., 1990; B: Gargini et al., 1995; B: Landini, 2005; C: Doveri, 2006; D: Gargini et al., 2011)

In generale, bisogna sottolineare che le variazioni cronologiche del livello di falda dipendono sia dalla diversa ricarica che dal diverso sfruttamento. Inoltre i pozzi misurati nelle varie campagne generalmente non sono gli stessi e di conseguenza il confronto deve essere fatto nell'insieme e non puntualmente. Pur nei limiti esposti, si possono tuttavia sottolineare aspetti importanti.

Nell'insieme le varie piezometrie presentano una simile morfologia. E' evidente un'alimentazione da parte del Fiume Bisenzio, con particolare riferimento alla zona del suo ingresso nella piana, nonché dagli acquiferi in roccia dei settori collinari/montani (con particolare riferimento alla Calvana). Nella parte centrale della piana, tutte le piezometrie riportano inoltre depressioni legate agli emungimenti (principalmente di natura industriale e idropotabile), sebbene nell'ultimo elaborato, relativo al 2010, tali depressioni risultino meno accentuate e relativamente spostate verso Sud.

In merito ai valori assoluti è altrettanto chiaro come fino al 2000 le depressioni piezometriche siano caratterizzate da quote molto basse, dell'ordine dei 10-15 m s.l.m.. Già nel 2006 si assiste invece ad una risalita generale dei livelli, che nelle aree più depresse vanno ad attestarsi intorno ai 20-25 m s.l.m.. Nel 2010 tale risalita risulta ancora più accentuata ed i valori più bassi registrati non risultano inferiori ai 30 m s.l.m. In quest'ultimo periodo i minimi piezometri sembrano anche esser relativamente migrati verso sud.

Questo processo di risalita dei livelli piezometrici tra il 2000 ed il 2010 è associato alla crisi del settore tessile, che conseguentemente ha determinato una forte riduzione degli emungimenti ad uso industriale. Tale aspetto e l'"abbandono" di alcuni pozzi idropotabili (legato ad una scarsa qualità delle acque) della zona più a ridosso della città, nonché la compensazione di questi con maggiori emungimenti a scopo idropotabile nella parte a sud, sono probabilmente responsabili della relativa migrazione dei minimi piezometrici verso la parte più meridionale della piana.

### 4 ASPETTI NOTI DI CONTAMINAZIONE DELL'ACQUIFERO PRATESE

Per quanto riguarda il monitoraggio qualitativo esistente, Publiacqua e ARPAT hanno messo a disposizione dati dal 2000 a 2015 di campionamenti/analisi (non continui) su 45 pozzi situati a sud di Prato in località Vergaio, Iolo e Badie (Figura 4). Si è proceduto ad un'ulteriore suddivisione dell'area in quattro zone che corrispondono a Badie Nord e Sud, Vergaio e Iolo, utilizzando l'Autostrada A11 come limite Nord-Sud.

Per ogni zona sono stati elaborati grafici concentrazione\tempo, inoltre si sono utilizzati toni di colore diverso a seconda della profondità del pozzo:

- Profondità fra 0 - 40 m in scala di colori del verde
- Profondità fra 40 - 60 m in scala di colori rosso- arancio
- Profondità maggiore di 60 m in scala di colori azzurro-blu.

Allo stato attuale dello studio l'indicazione della profondità del pozzo ha solo un valore molto indicativo, in quanto i pozzi in oggetto presentano finestre su tutti gli orizzonti permeabili più produttivi. L'incrocio di queste informazioni con il monitoraggio isotopico e di qualità nelle diverse condizioni previste in questo studio, permetterà successivamente di dedurre informazioni più dettagliate sullo stato di qualità dei diversi livelli produttivi. Per il momento l'obiettivo è quello di sottolineare eventuali andamenti macroscopici delle concentrazioni dei contaminanti presi in esame.

Il fenomeno dell'inquinamento da nitrati e tetracloruri, con concentrazioni molto variabili, interessa l'area presa in esame con caratteristiche fra loro differenti.

Per quanto concerne i nitrati le zone nord (Vergaio e Badie Nord) presentano i valori più elevati di concentrazione con un trend stabile o di leggerissimo decremento, dei valori più alti, negli ultimi 5 anni. Le zone sud hanno invece un andamento complementare, con un'evidente crescita delle concentrazioni per quasi tutti i pozzi, indipendentemente dalla profondità.

Anche per quanto concerne il tetracloroetilene le zone nord hanno concentrazioni nettamente superiori (circa un ordine di grandezza in questo caso) a quelle della zona sud (Iolo e Badie sud). Negli oltre 15 anni esaminati i dati presentano i valori maggiori fino al 2004, per poi scendere gradualmente fino al 2015 (pur in presenza di possibili fluttuazioni temporali più o meno accentuate).

Nella zona di Iolo, pur all'interno di valori inferiori a 50 µg/l è evidente un incremento a partire dal 2010. Un comportamento meno evidente, ma analogo è presente nell'area di Badie sud.

Quanto rilevato appare di estremo interesse e dimostra comunque una coerenza generale dei dati a disposizione pur considerando la lunga serie storica ed il numero elevato di pozzi monitorati.



Figura 4 - Distribuzione e zonizzazione della profondità dei pozzi di Pubblicaacqua

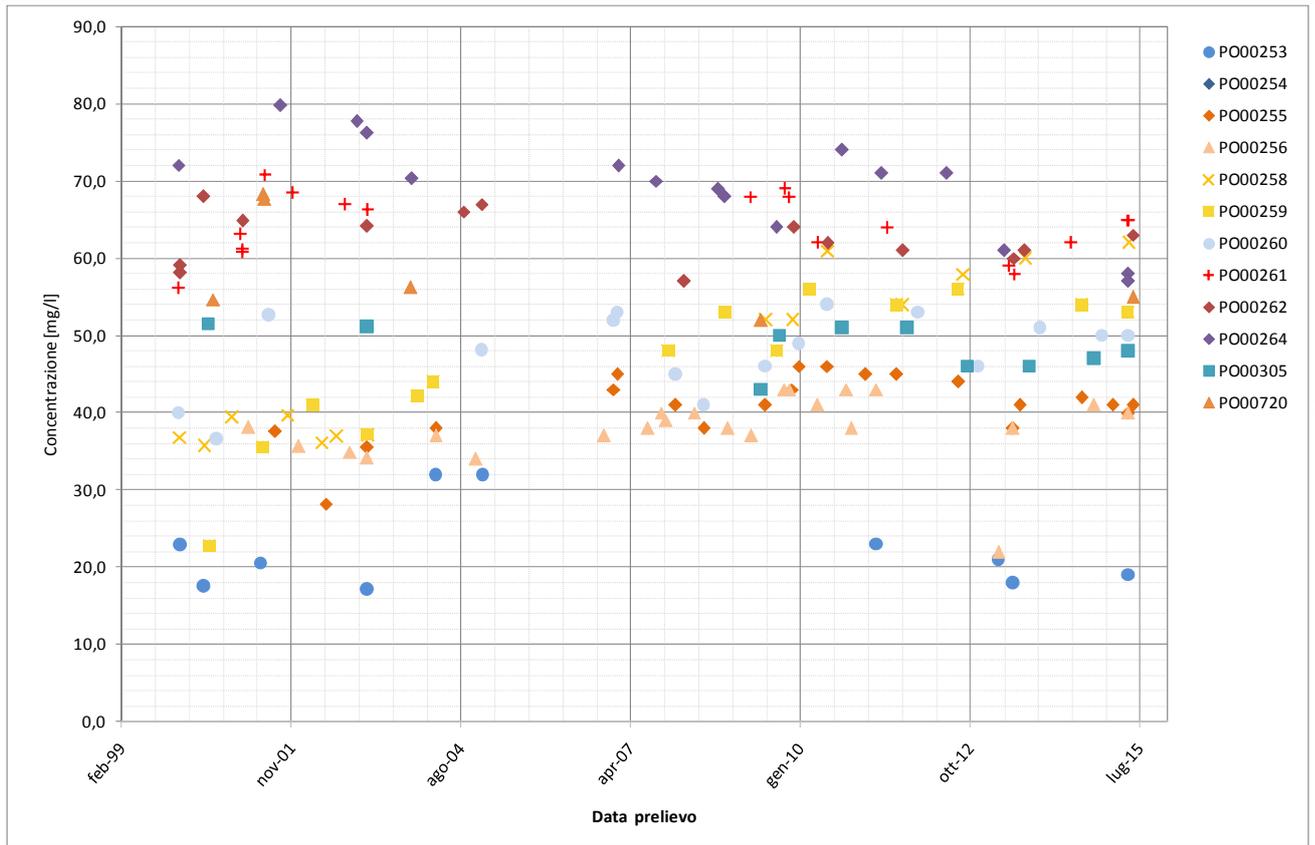


Figura 5 - Andamento della concentrazione dei nitrati nel tempo, in relazione alla profondità - Zona Badie Nord

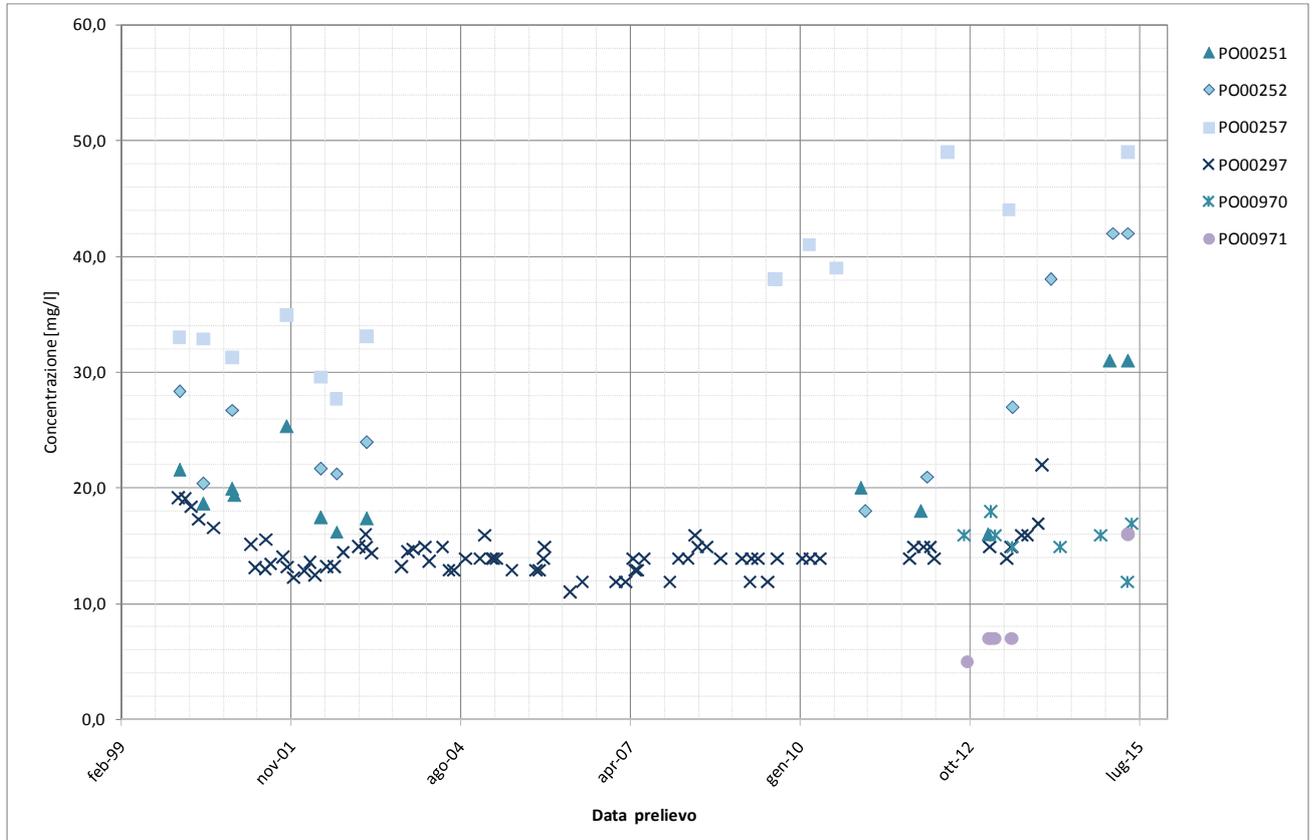


Figura 6 - Andamento della concentrazione dei nitrati nel tempo, in relazione alla profondità - Zona Badie Sud

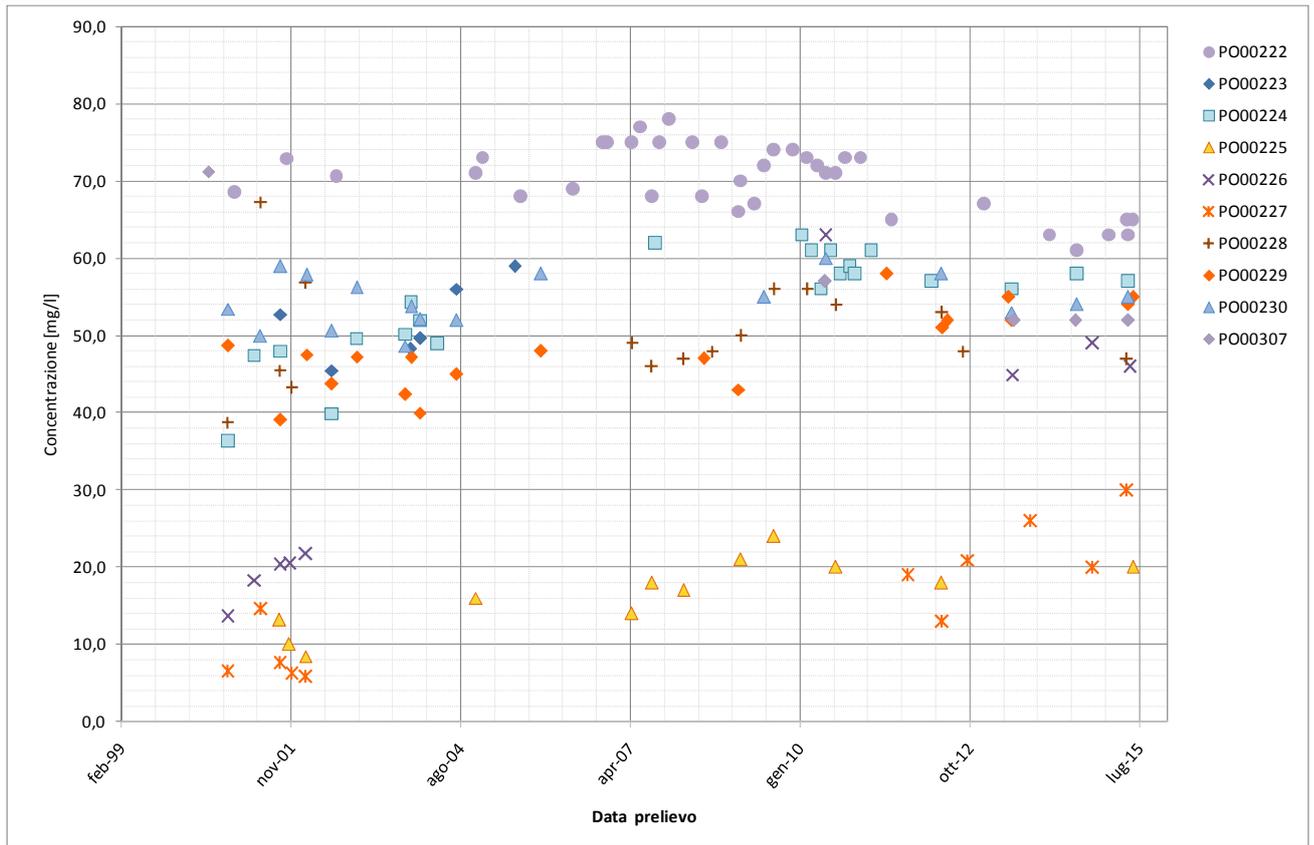


Figura 7 - Andamento della concentrazione dei nitrati nel tempo, in relazione alla profondità - Zona Vergaio

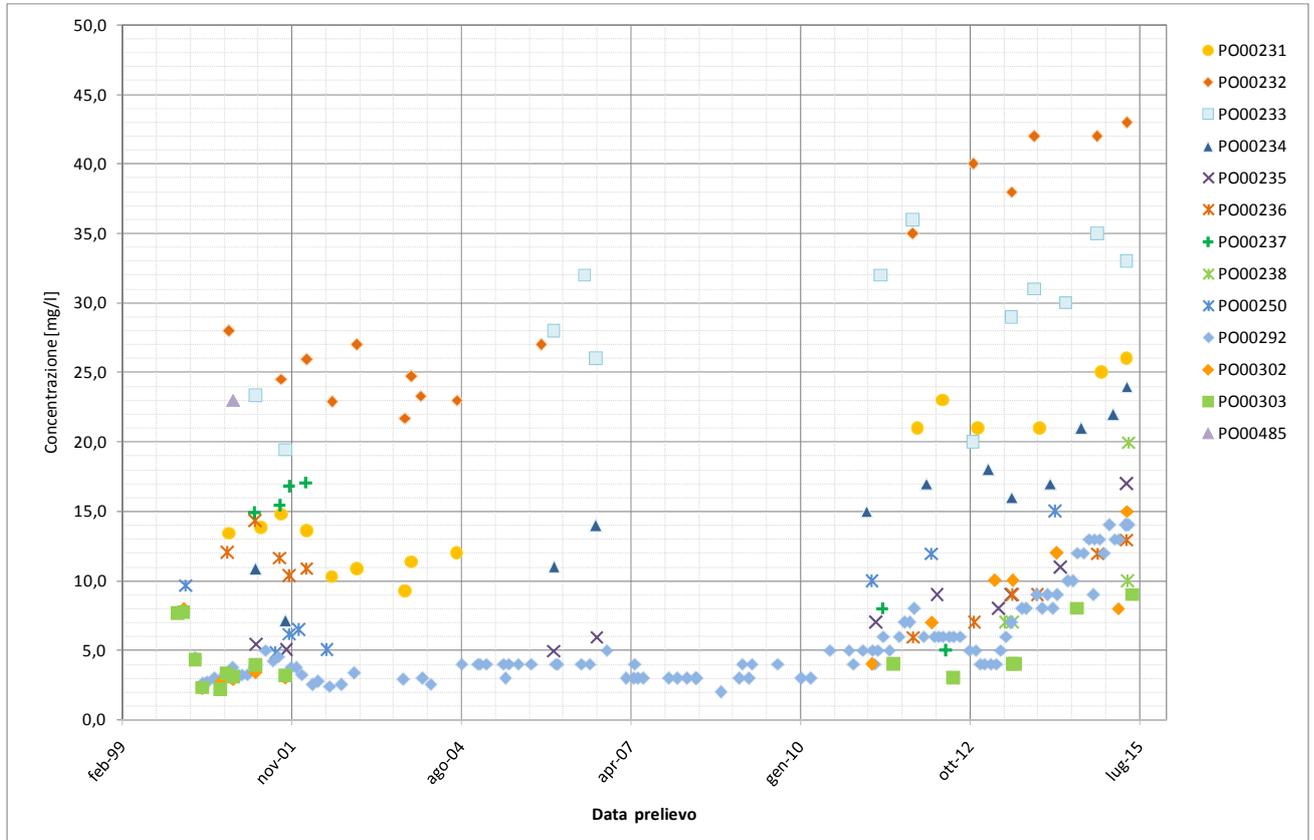


Figura 8 - Andamento della concentrazione dei nitrati nel tempo, in relazione alla profondità - Zona Iolo

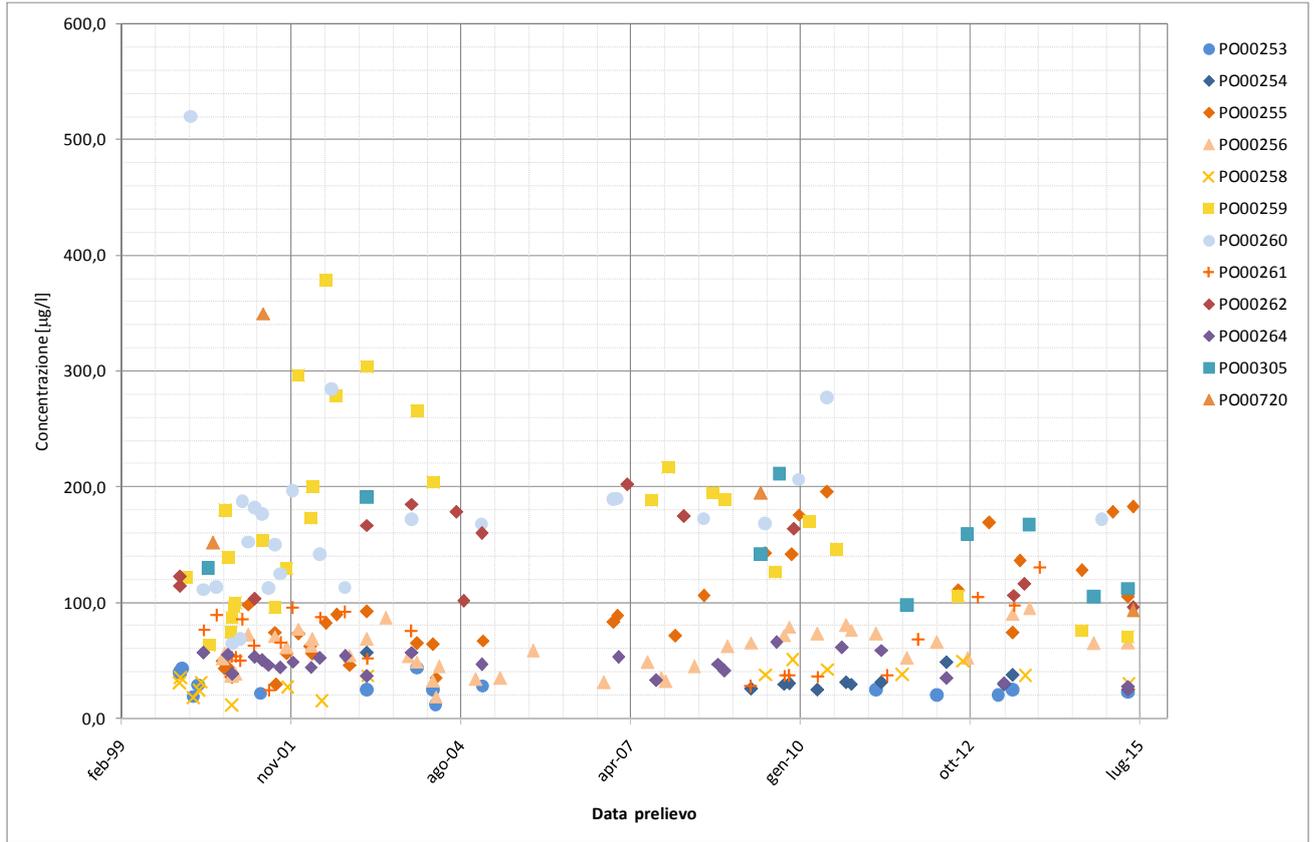


Figura 9 - Andamento della concentrazione dei tetracloroetilene nel tempo, in relazione alla profondità - Zona Badie Nord

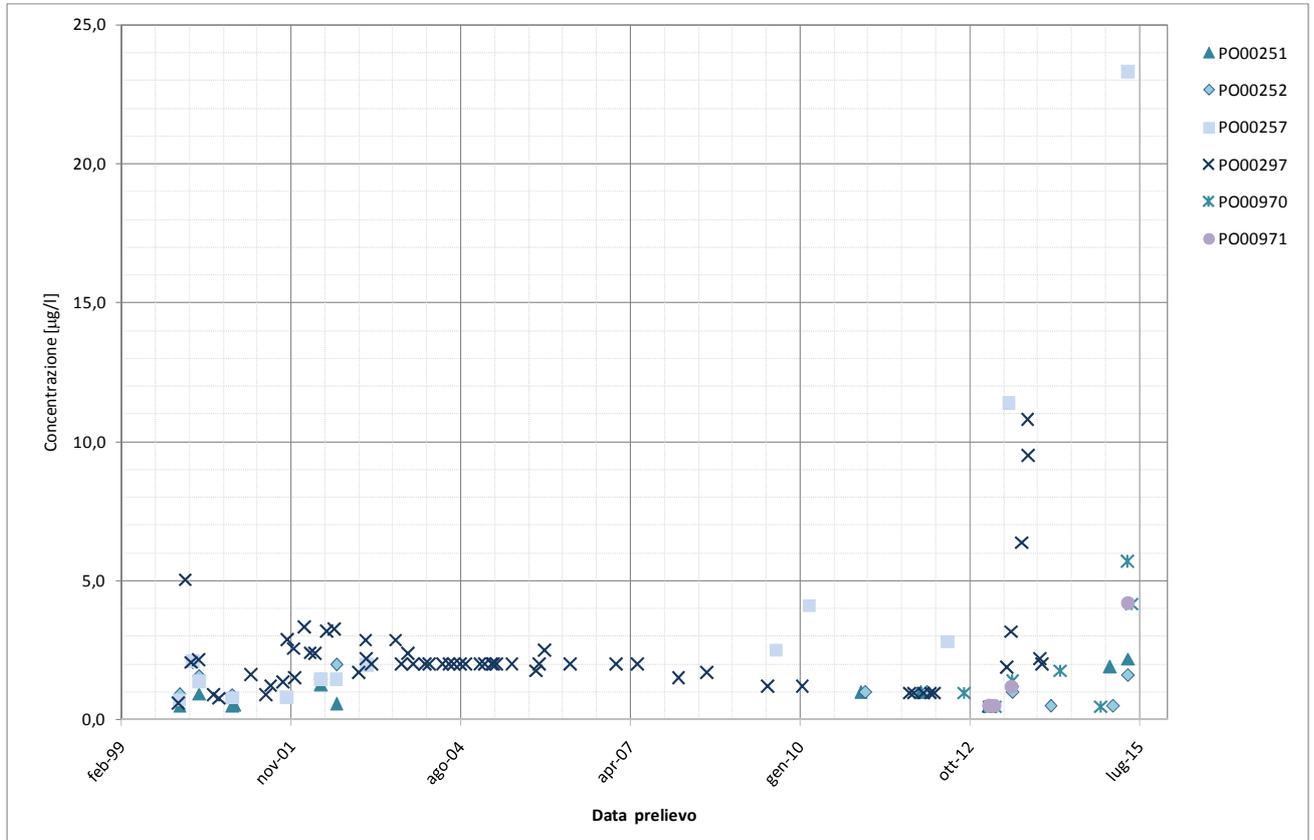


Figura 10 - Andamento della concentrazione dei tetracloroetilene nel tempo, in relazione alla profondità - Zona Badie Sud

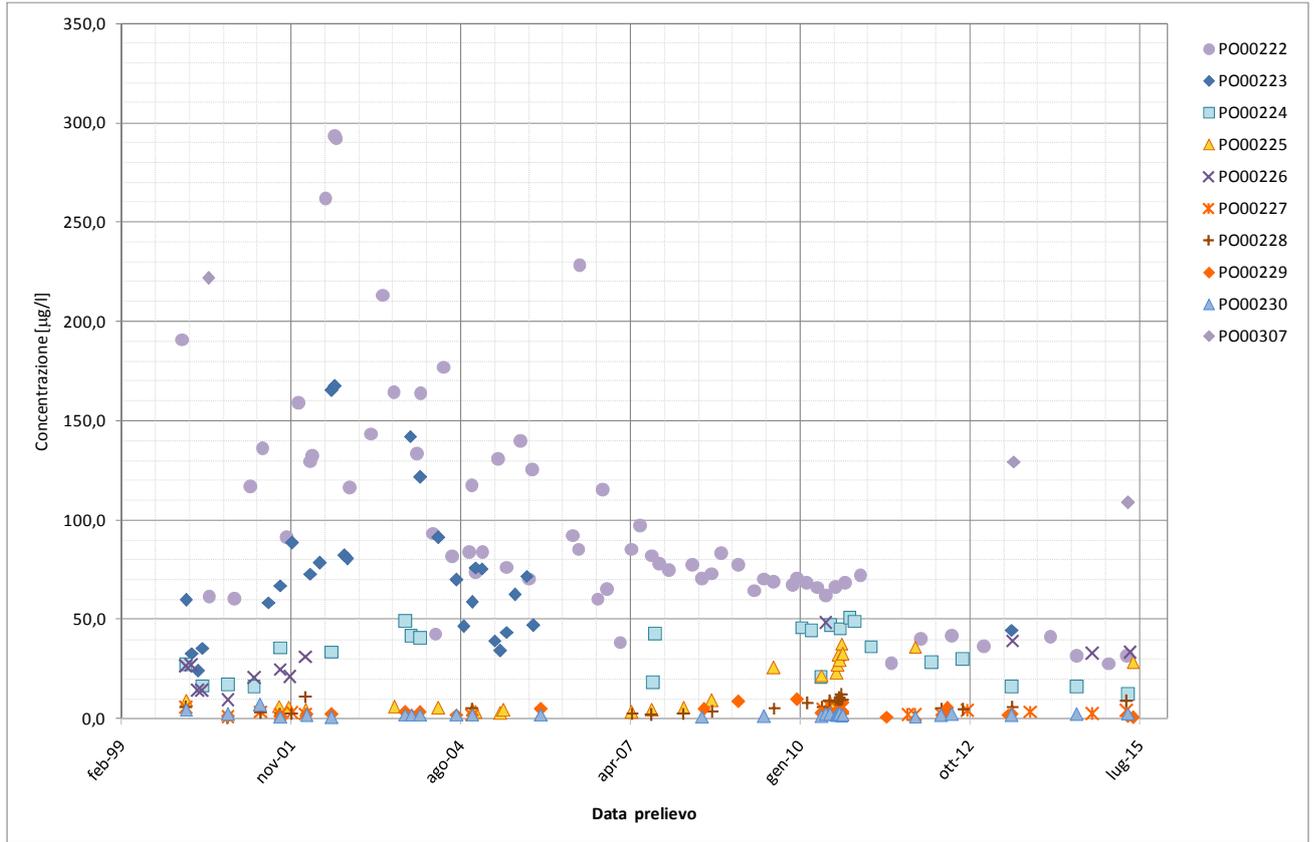


Figura 11 - Andamento della concentrazione dei tetracloroetilene nel tempo, in relazione alla profondità - Zona Vergaio

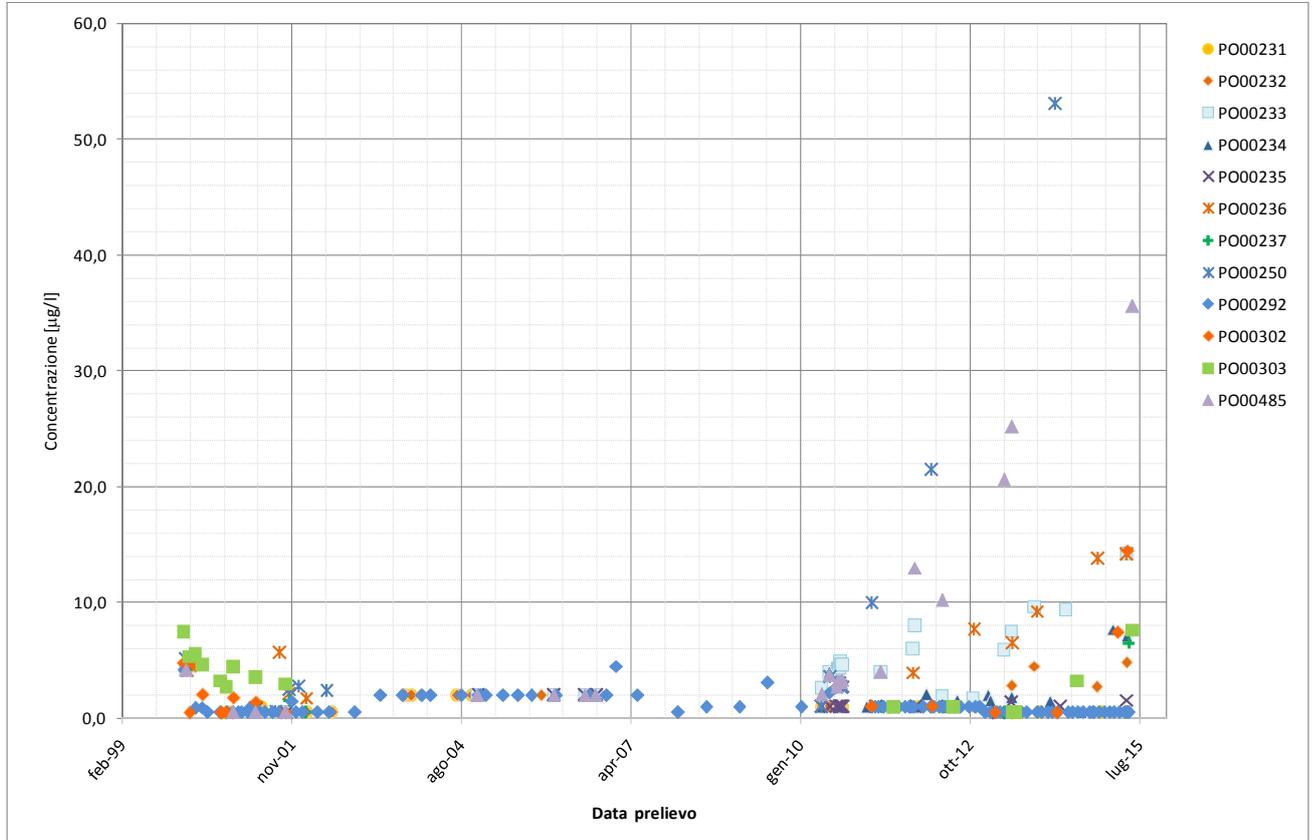


Figura 12 - Andamento della concentrazione dei tetracloroetilene nel tempo, in relazione alla profondità - Zona Zola

### 5 INDAGINI SVOLTE NELL'AMBITO DEL PROGETTO

Le indagini previste dal programma di studio sono state organizzate secondo due tipologie di azione. Nel primo caso le indagini sono rivolte ad un'area estesa a tutto (o gran parte) l'acquifero di Prato, al fine di avere un quadro d'insieme aggiornato rispetto all'ultimo studio svolto sull'area da Gargini et al. (2011). Nel secondo, si tratta di test svolti su due siti specifici (dell'estensione di circa 1 km<sup>2</sup>) ed in relazione ad una perturbazione idrodinamica indotta (interruzione per alcuni giorni di un quantitativo significativo di emungimenti), con la finalità di verificare se i contaminanti presenti nelle acque (organoalogenati e nitrati) sono associabili a specifiche componenti della circolazione idrica sotterranea ospitata nel sistema acquifero.

A fronte di tale approccio, sono state svolte due campagne estese, rispettivamente a fine Giugno-inizio Luglio e Settembre 2015, nonché due test con perturbazione idrodinamica che hanno interessato due zone diverse, rispettivamente nei periodi 15-28 Ottobre 2015 e 1-12 Febbraio 2016.

Per entrambe le tipologia d'azione sono stati misurati in situ i livelli idrici ed i parametri fisico-chimici delle acque, nonché prelevati campioni da analizzare in laboratorio, sia sui composti chimici (compresi i due contaminanti di maggiore interesse, tetracloroetilene e nitrati), sia sugli isotopi dell'acqua. Su tutti i punti su cui è stata eseguita la misura di livello idrico sono state rilevate le coordinate XYZ con GPS differenziale per misure di precisione, in modo da ottenere valori piezometrici accurati.

Il lavoro di campagna ha interessato pozzi di Publiacqua e pozzi privati appartenenti alla rete di monitoraggio della Provincia, nonché alcuni punti relativi al Fiume Bisenzio ed al Torrente Bardena (detto anche Fosso Dogaia). Le operazioni sono state svolte in collaborazione tra il personale IGG-CNR, West Systems, Publiacqua, Ingegnerie Toscane e Provincia di Prato.

Le analisi chimiche sono state svolte dai laboratori Publiacqua, mentre quelle isotopiche sono state realizzate nei laboratori IGG-CNR di Pisa.

#### 5.1 CAMPAGNE ESTESE DI MISURA E CAMPIONAMENTO

Le due campagne estese sono state eseguite rispettivamente nei periodi fine Giugno - inizio Luglio 2015 e Settembre 2015. La prima, che è stata preceduta dal periodo piovoso invernale - primaverile (oltre 370 mm di pioggia da Gennaio a Giugno - Figura 13), è da ritenersi rappresentativa di condizioni di morbida, mentre la seconda può considerarsi rappresentativa di condizioni prossime a quelle di magra, visti i circa 100 mm di pioggia caduti nel periodo Luglio - Settembre (Figura 13), quando le temperature favoriscono un alto tasso di evapotraspirazione.

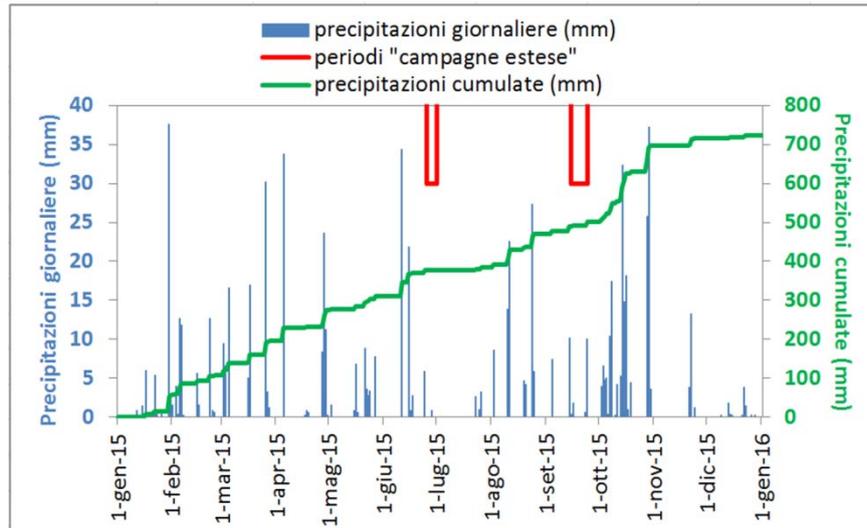


Figura 13 – Precipitazioni della zona di Prato nel corso del 2015 (dati relativi alla stazione di Prato Università TOS01001205 - Servizio Idrologico Regionale <http://www.sir.toscana.it>)

I punti presi in esame nell'ambito di queste campagne sono rappresentati in Figura 14, mentre i dati misurati in campagna ed i dati analitici di laboratorio sono riportati rispettivamente nella Tabella 1 e Tabella 2.

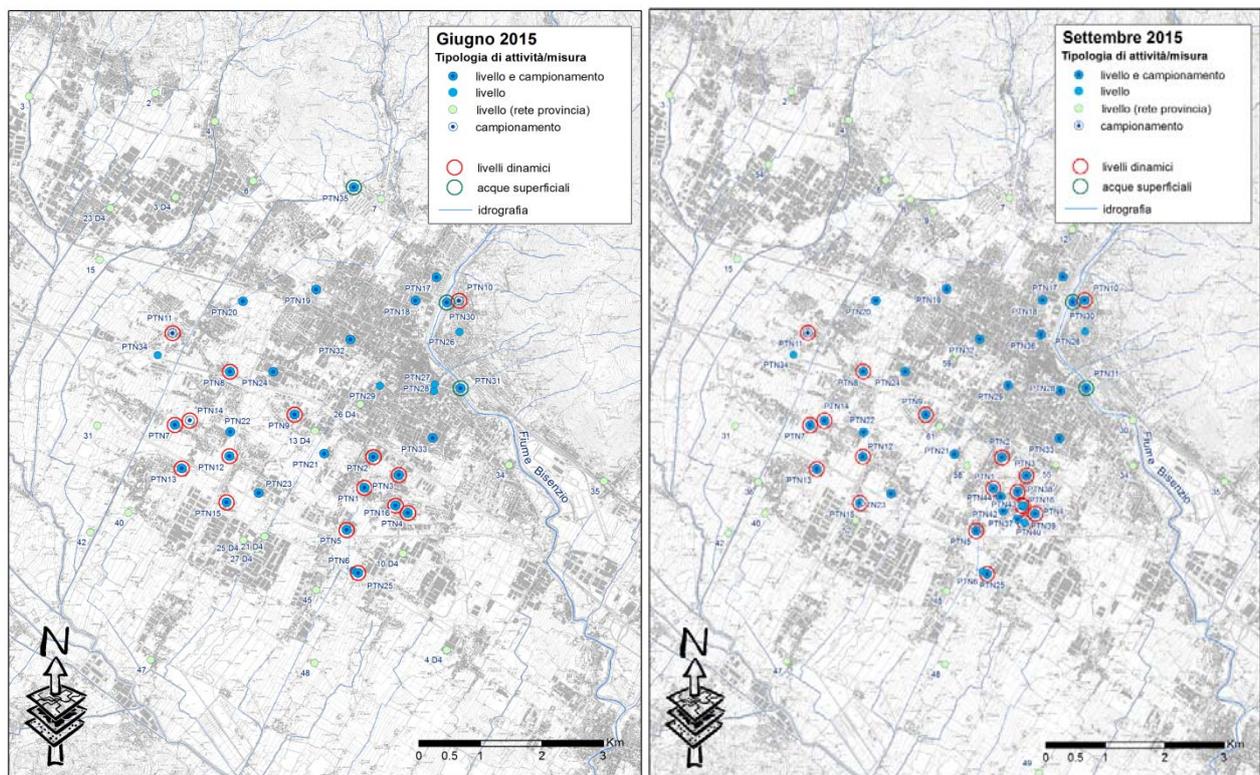


Figura 14 - Pozzi presi in esame nel corso delle due campagne estese, Giugno e Settembre 2015

Viste le finalità dello studio, una significativa parte dei pozzi presi in esame appartiene alla rete di Publicacqua e la logistica non ha permesso di interrompere momentaneamente l'attività di questi pozzi in occasione delle campagne estese. Ne consegue che una parte significativa dei dati di livello rilevati, non solo è rappresentativa di livelli dinamici, ma è anche affetta dalle perdite di carico dell'opera di captazione. Al fine di eliminare o comunque ridurre quest'ultimo aspetto, si è adottata una procedura (basata sulle caratteristiche idrauliche dell'acquifero, sulla portata e la portata specifica dei pozzi) per stimare detta perdita di carico nei vari pozzi attivi al momento delle misure di livello. I livelli piezometrici ottenuti a valle di questa procedura sono senza dubbio da ritenersi più rappresentativi dell'idrodinamica dell'acquifero, sia pur non privi di approssimazione.

Nella Figura 15 e nella Figura 16 sono inserite le piezometrie elaborate per le due campagne estese. Entrambe le elaborazioni, rispetto a quelle degli anni passati, confermano il ruolo significativo nell'alimentazione del sistema da parte del Fiume Bisenzio e degli acquiferi collinari/montani, nonché la presenza di depressioni piezometriche legate allo sfruttamento della falda. E' inoltre confermata un'estensione/migrazione di queste depressioni verso Sud (in analogia a quanto già evidenziato con la piezometria del 2010).

# RELAZIONE FINALE (Report 2)

ID_CNR	vecchio_ID	Nome	X_GB	Y_GB	Quota_Rif (m.s.l.m.)	Prof. (m)	Data	Tipo di operazione	Liv. piez. statico (m.s.l.m.)	Liv. piez. dinamico (m.s.l.m.)	Liv. piez. dinamico ricalcolato (m.s.l.m.)	T (°C)	pH	CE (µS/cm a 25°C)	µl HCl 0,1 N
PTN1	PO261	Pozzo Grignano lavatoi	1667708	4858750	43.81	53	25/6/15	livello e campionamento		32.41	30.48	16.9	7.23	1116	62.6
PTN2	PO284	Pozzo Tempesti	1667851	4859263	48.30	120	25/6/15	livello e campionamento		25.55	31.17	17.5	7.10	1007	60.5
PTN3	PO305	Pozzo Fiorentina 1	1668268	4858962	45.88	74	25/6/15	livello e campionamento		30.43	31.58	17.1	7.19	1000	53.5
PTN4	PO253	Pozzo Badie 1	1668416	4858328	43.02	77	25/6/15	livello e campionamento		21.42	32.60	16.3	7.41	1023	52.0
PTN5	PO258	Pozzo Cafaggio lavatoi	1667416	4858043	41.13	51	25/6/15	livello e campionamento		24.63	31.20	16.0	7.12	1061	69.5
PTN6	PO252	Pozzo Baciacavallo 2	1667525	4857361	38.85	76	25/6/15	livello	31.15						
PTN7	PO227	Pozzo Casale 2	1664621	4859803	41.83	58	25/6/15	livello e campionamento		31.63	34.59	15.6	7.12	908	70.0
PTN8	PO222	Pozzo Capezzana Lavatoi	1665517	4860690	47.17	77	25/6/15	livello e campionamento		30.07	30.66	16.4	7.16	970	61.0
PTN9	PO307	Pozzo Gescal	1666573	4859974	46.44	81	25/6/15	livello e campionamento		31.04	34.72	16.7	7.37	955	57.5
PTN10	PO296	Pozzo Molino Flettote - rif. Arpat	1669246	4861877	67.50	40	26/6/15	campionamento				13.8	7.19	959	56.5
PTN11	PO294	Pozzo Lastruccia	1664582	4861337	42.32	62	26/6/15	campionamento				16.2	7.25	815	64.0
PTN12	PO229	Pozzo Cava 2	1665510	4859276	45.96	59	26/6/15	livello e campionamento		24.67	33.86	16.2	7.03	1077	73.5
PTN13	PO232	Pozzo via per lolo	1664733	4859072	43.55	53	26/6/15	livello e campionamento		13.86	32.99	15.7	7.15	997	71.5
PTN14	PO224	Pozzo Traversa Vicinale	1664865	4859874	45.58	65	26/6/15	campionamento				16.2	7.10	1043	69.0
PTN15	PO245	Pozzo Macrolotto 9 - rif. Arpat	1665461	4858503	42.93	81	26/6/15	livello e campionamento		32.51	32.51	17.3	7.03	1076	64.5
PTN16	PO255	Pozzo Badie 3	1668214	4858446	46.62	54	28/6/15	livello e campionamento		21.04	30.75	16.5	7.38	966	57.5
PTN17	22D4bis	Via Bologna 140	1668882	4862271	67.00	60	30/6/15	livello e campionamento	48.99			17.1	7.50	1038	57.0
PTN18	11D4	Via Bologna 106	1668539	4861876	66.43	42	30/6/15	livello e campionamento	50.23			17.5	7.53	1005	56.3
PTN19	19	Via Nettuno 4	1666920	4862065	59.82	10	30/6/15	livello e campionamento	48.87			17.3	7.24	946	64.5
PTN20	56	ospedale	1665729	4861867	51.85	51	30/6/15	livello e campionamento	35.38			16.6	7.12	880	74.0
PTN21	1D4	Penny Via Traversa	1667052	4859321	47.42	80	30/6/15	livello e campionamento	34.76			16.8	7.28	971	58.0
PTN22	33	Summa Cinzia	1665522	4859883	46.38	20	30/6/15	livello e campionamento	35.53			16.6	6.71	1024	61.5
PTN23	new	Biancalani	1665984	4858660	43.03	46	30/6/15	livello e campionamento	34.20			17.0	7.28	876	68.5
PTN24	8D4	Rifinizioni S. Stefano	1666225	4860690	51.11	45	30/6/15	livello e campionamento	34.57			18.1	7.09	1048	61.5
PTN25	PO251	Pozzo Baciacavallo 1	1667604	4857321	38.60	72	1/7/15	livello e campionamento		29.10	27.92	16.7	7.00	1238	70.5
PTN26	PO280	Pozzo Cafissi	1669257	4861359	63.28	50	1/7/15	livello	56.15						
PTN27	PO784	Piezometro S. Marco	1668857	4860479	57.52	57	1/7/15	livello	38.67						
PTN28	PO785	Piezometro Pomeria	1668841	4860368	58.46	55	1/7/15	livello	38.33						
PTN29	PO775	Piezometro Macelli - Cavour *	1667963	4860455	58.18	57	1/7/15	livello	37.13						
PTN30	20	Bisenzio_Ponte Datini	1669053	4861851	67.32		1/7/15	livello e campionamento	61.07			25.7	8.45	478	31.0
PTN31	27	Bisenzio_Ponte Vittoria	1669278	4860412	62.64		1/7/15	livello e campionamento	52.92			28.6	8.17	550	34.5
PTN32	59	Tintoria Biagioli	1667477	4861228	58.54	62	1/7/15	livello e campionamento	40.67			17.7	7.37	873	55.0
PTN33	5D4		1668822	4859580	51.78	60	1/7/15	livello e campionamento	34.92			18.3	7.17	859	55.5
PTN34	new 2	Distributore Q8 filtri - 5/12	1664336	4860969	45.02	22	1/7/15	livello	38.59						
PTN35	new 3	Fosso Dogaia	1667538	4863776	74.38		1/7/15	livello e campionamento	70.80			29.5	8.79	484	40.5
PTN1	PO261	Pozzo Grignano lavatoi	1667708	4858750	43.81	53	24/9/15	livello e campionamento		30.17	28.16	17.1	7.09	985	64.0
PTN2	PO264	Pozzo Tempesti	1667851	4859263	48.30	120	15/9/15	livello e campionamento		25.50	29.13	18.3	7.06	929	59.5
PTN3	PO305	Pozzo Fiorentina 1	1668268	4858962	45.88	74	24/9/15	livello e campionamento		29.49	28.74	17.3	7.11	968	53.5
PTN4	PO253	Pozzo Badie 1	1668416	4858328	43.02	77	24/9/15	livello e campionamento		23.13	30.70	16.7	7.22	942	52.5
PTN5	PO258	Pozzo Cafaggio lavatoi	1667416	4858043	41.13	51	15/9/15	livello e campionamento		24.57	28.70	17.0	6.98	1004	65.5
PTN6	PO252	Pozzo Baciacavallo 2	1667525	4857361	38.85	76	15/9/15	livello		21.17	29.02				
PTN7	PO227	Pozzo Casale 2	1664621	4859803	41.83	58	15/9/15	livello e campionamento		26.85	37.90	16.5	6.90	858	69.5
PTN8	PO222	Pozzo Capezzana Lavatoi	1665517	4860690	47.17	77	15/9/15	livello e campionamento		24.80	31.21	17.2	6.92	906	61.5
PTN9	PO307	Pozzo Gescal	1666573	4859974	46.44	81	15/9/15	livello e campionamento		26.05	32.51	17.7	7.08	879	55.0
PTN10	PO296	Pozzo Molino Flettote - rif. Arpat	1669246	4861877	67.50	40	16/9/15	livello e campionamento		49.40	49.40	17.7	7.02	848	57.0
PTN11	PO294	Pozzo Lastruccia	1664582	4861337	42.32	62	15/9/15	campionamento				17.6	7.02	818	65.5
PTN12	PO229	Pozzo Cava 2	1665510	4859276	45.96	59	16/9/15	livello e campionamento		23.13	32.03	17.0	6.78	1038	73.5
PTN13	PO232	Pozzo via per lolo	1664733	4859072	43.55	53	16/9/15	livello e campionamento		13.85	34.09	15.6	6.93	959	74.5
PTN14	PO224	Pozzo Traversa Vicinale	1664865	4859874	45.58	65	16/9/15	livello e campionamento		22.32	35.62	17.0	6.87	958	69.0
PTN15	PO245	Pozzo Macrolotto 9 - rif. Arpat	1665461	4858503	42.93	81	16/9/15	livello e campionamento	31.07			16.5	6.81	1010	68.0
PTN16	PO255	Pozzo Badie 3	1668214	4858446	46.62	54	24/9/15	livello e campionamento		20.24	28.45	16.6	7.18	929	60.0
PTN17	22D4bis	Via Bologna 140	1668882	4862271	67.00	60	22/9/15	livello e campionamento	52.07			17.7	7.30	976	58.0
PTN18	11D4	Via Bologna 106	1668539	4861876	66.43	42	22/9/15	livello e campionamento	51.93			17.9	7.35	951	55.0
PTN19	19	Via Nettuno 4	1666920	4862065	59.82	10	23/9/15	livello e campionamento	48.49			17.3	6.97	1039	71.5
PTN20	56	ospedale	1665729	4861867	51.85	51	23/9/15	livello e campionamento	33.84			16.9	7.06	946	78.0
PTN21	1D4	Penny Via Traversa	1667052	4859321	47.42	80	22/9/15	livello e campionamento	34.04			18.1	7.21	1029	68.0
PTN22	33	Summa Cinzia	1665522	4859883	46.38	20	23/9/15	livello e campionamento	32.87			17.1	6.82	1105	76.0
PTN23	new	Biancalani	1665984	4858660	43.03	46	23/9/15	livello e campionamento	32.69			17.4	6.89	1026	75.5
PTN24	8D4	Rifinizioni S. Stefano	1666225	4860690	51.11	45	22/9/15	livello e campionamento	32.54			18.6	7.04	1021	69.0
PTN25	PO251	Pozzo Baciacavallo 1	1667604	4857321	38.60	72	15/9/15	livello e campionamento		20.83	28.72	17.4	6.82	1155	73.5
PTN28	PO785	Piezometro Pomeria	1668841	4860368	58.46	55	17/9/15	livello e campionamento	37.76			18.8	7.11	680	45.5
PTN29	PO775	Piezometro Macelli - Cavour *	1667963	4860455	58.18	57	16/9/15	livello e campionamento	36.48			17.3	6.94	936	61.5
PTN30	20	Bisenzio_Ponte Datini	1669053	4861851	67.32		17/9/15	livello e campionamento	61.06			23.7	7.78	642	39.5
PTN31	27	Bisenzio_Ponte Vittoria	1669278	4860412	62.64		17/9/15	livello e campionamento	52.89			24.5	7.93	642	36.0
PTN32	59	Tintoria Biagioli	1667477	4861228	58.54	62	22/9/15	livello e campionamento	39.29			18.1	7.25	846	56.5
PTN33	5D4		1668822	4859580	51.78	60	22/9/15	livello e campionamento	34.00			18.5	7.13	849	52.5
PTN36	PO00787	Piezometro P.za Ciardi	1668513	4861303	63.98		15/9/15	livello e campionamento	51.58			18.5	6.78	993	72.5
PTN37	PO00256	Pozzo Badie 4	1668119	4858234	43.27	57	24/9/15	livello e campionamento	26.46			17.3	6.98	994	65.0
PTN38	PO00260	Pozzo Fiorentina 2	1668121	4858692	45.23	78	24/9/15	livello e campionamento		27.06	29.44	17.5	7.04	1094	53.5
PTN42	PO00720	v Gora di Grignano	1667877	4858373	43.39	59	24/9/15	livello e campionamento		28.37	29.25	17.4	7.10	1062	69.0
PTN44		tecnocolor	1667835	4858605	45.72		23/9/15	livello e campionamento	30.91			17.4	7.02	957	63.5

Tabella 1 – Dati reperiti nel corso delle attività di Giugno e Settembre 2015

# RELAZIONE FINALE (Report 2)

ID_CNR	Prof. (m)	Data	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L Na	mg/L K	mg/L Cl	mg/L NO3	mg/L SO4	mg/L HCO3	mg/L NH4+	mg/L Br	mg/L NO2	µg/L Tetracloroetilene	µg/L Tricloroetilene	µg/L Tetracl.+ tricl.	δ <sup>18</sup> O‰ (vs. V-SMOW)	δ <sup>2</sup> H‰ (vs. V-SMOW)
PTN1	53.00	25/6/15	122	16	40	2	70	65	49	393	<0.05	0.11	<0.02	89.8	<1	90	-6.45	-40.6
PTN2	120.00	25/6/15	111	14	52	3	69	58	53	361	<0.05	0.10	<0.02	32.1	<1	33	-6.57	-42.2
PTN3	73.50	25/6/15	108	14	49	2	83	49	56	332	<0.05	0.11	<0.02	224.0	<1	225	-6.56	-42.1
PTN4	77.00	25/6/15	90	12	80	2	117	21	41	316	0.06	0.15	<0.02	24.6	<1	25	-6.43	-42.6
PTN5	51.00	25/6/15	119	17	43	1	69	60	47	426	<0.05	0.12	<0.02	31.3	<1	32	-6.32	-41.2
PTN7	57.50	25/6/15	118	14	29	1	36	19	49	439	<0.05	0.10	<0.02	3.0	<1	4	-6.00	-39.2
PTN8	77.00	25/6/15	116	14	33	1	49	62	44	389	<0.05	0.08	<0.02	42.0	<1	43	-6.64	-41.5
PTN9	81.00	25/6/15	108	13	41	2	61	55	49	356	<0.05	0.08	<0.02	205.0	<1	206	-6.70	-42.7
PTN10	40.00	26/6/15	111	12	38	2	57	36	42	369	<0.05	0.07	<0.02	<1.0	<1	<1	-6.82	-42.8
PTN11	62.00	26/6/15	83	30	34	1	36	30	39	414	<0.05	0.10	<0.02	470.0	<1	471	-6.16	-38.2
PTN12	59.00	26/6/15	153	14	31	2	57	52	44	508	<0.05	0.09	<0.02	1.3	<1	2	-6.34	-39.3
PTN13	53.00	26/6/15	136	16	27	2	51	45	41	453	<0.05	0.10	<0.02	5.3	<1	6	-6.26	-39.5
PTN14	65.00	26/6/15	132	15	33	2	52	56	44	432	<0.05	0.10	<0.02	9.4	<1	10	-6.40	-41.0
PTN15	81.00	26/6/15	148	15	33	2	69	52	55	435	<0.05	0.09	<0.02	328.0	<1	329	-6.27	-40.9
PTN16	53.70	26/6/15	115	15	46	2	71	40	54	367	<0.05	0.11	<0.02	257.0	<1	258	-6.62	-43.0
PTN17	60.00	30/6/15	95	10	93	2	88	27	63	366	<0.05	0.21	<0.02	2.5	<1	3	-6.89	-44.5
PTN18	42.00	30/6/15	105	11	81	2	91	14	86	353	<0.05	0.11	<0.02	<1.0	<1	<1	-6.84	-44.3
PTN19	10.00	30/6/15	124	15	47	2	44	78	55	410	<0.05	0.08	<0.02	<1.0	<1	<1	-6.62	-43.1
PTN20	51.00	30/6/15	85	43	33	1	36	36	54	458	<0.05	0.09	<0.02	250.0	<1	251	-6.47	-41.6
PTN21	80.00	30/6/15	119	17	44	2	70	54	53	373	<0.05	0.10	<0.02	<1.0	<1	<1	-6.46	-41.7
PTN22	20.00	30/6/15	158	13	30	2	59	56	53	462	<0.05	0.10	<0.02	478.0	<1	479	-6.38	-40.1
PTN23	45.50	30/6/15	127	14	32	11	60	<1	49	456	<0.05	0.12	<0.02	192.0	<1	193	-6.07	-39.9
PTN24	45.00	30/6/15	131	14	62	3	66	72	55	435	<0.05	0.09	<0.02	19.5	<1	20	-6.50	-41.6
PTN25	72.00	1/7/15	154	21	54	2	111	37	108	430	0.09	0.15	<0.02	2.7	<1	3	-6.23	-39.8
PTN30	n.n.	1/7/15	43	9	44	2	35	<1	47	190	<0.05	0.05	<0.02	<1.0	<1	<1	-6.52	-41.5
PTN31	n.n.	1/7/15	54	8	41	3	33	2	50	225	<0.05	<0.05	0.05	<1.0	<1	<1	-6.79	-44.1
PTN32	62.00	1/7/15	102	9	52	2	56	54	48	355	<0.05	0.06	<0.02	25.1	<1	26	-6.67	-42.5
PTN33	60.00	1/7/15	91	11	65	2	66	36	59	339	<0.05	0.08	<0.02	732.0	1.2	733	-6.67	-42.4
PTN35	n.n.	1/7/15	34	33	14	1	18	1	25	264	<0.05	<0.05	<0.02	2.0	<1	3	-5.46	-36.2
PTN1	53.00	24/9/15	124	19	39	3	69	63	52	384	<0.05	0.11	<0.02	69.4	<1	70	-6.57	-42.8
PTN2	120.00	15/9/15	116	19	55	4	65	56	56	363	<0.05	0.09	<0.02	33.5	<1	34	-6.69	-43.3
PTN3	73.50	24/9/15	122	18	49	2	91	48	58	322	<0.05	0.11	<0.02	120.2	<1	121	-6.62	-42.8
PTN4	77.00	24/9/15	101	16	66	2	105	22	46	319	<0.05	0.14	<0.02	32.1	<1	33	-6.70	-42.4
PTN5	51.00	15/9/15	133	23	41	2	67	59	53	407	<0.05	0.11	<0.02	35.1	<1	36	-6.36	-41.6
PTN7	57.50	15/9/15	128	21	31	2	35	24	53	423	<0.05	0.09	<0.02	4.0	<1	5	-6.08	-39.4
PTN8	77.00	15/9/15	126	20	33	1	49	62	49	383	<0.05	0.08	<0.02	35.4	<1	36	-6.63	-42.0
PTN9	81.00	15/9/15	114	18	41	2	59	54	54	350	<0.05	0.09	<0.02	109.6	1.2	111	-6.77	-43.1
PTN10	40.00	16/9/15	111	14	39	1	59	36	47	361	<0.05	0.06	<0.02	<1.0	<1	<1	-6.80	-43.2
PTN11	62.00	15/9/15	87	36	34	1	37	30	46	403	<0.05	0.09	<0.02	231.2	1.1	232	-6.27	-40.0
PTN12	59.00	16/9/15	151	18	32	2	58	49	50	468	<0.05	0.09	<0.02	1.4	<1	2	-6.32	-39.9
PTN13	53.00	16/9/15	143	19	26	2	49	43	47	456	<0.05	0.10	<0.02	4.3	<1	5	-6.30	-39.5
PTN14	85.00	16/9/15	138	19	31	2	50	52	50	422	<0.05	0.10	<0.02	9.6	<1	10	-6.46	-40.7
PTN15	81.00	16/9/15	145	19	32	2	68	52	61	413	<0.05	0.10	<0.02	255.6	1.1	257	-6.52	-41.0
PTN16	53.70	24/9/15	114	17	52	2	69	37	58	366	<0.05	0.10	<0.02	134.1	<1	135	-6.57	-41.7
PTN17	60.00	22/9/15	99	12	85	3	83	23	65	353	<0.05	0.22	<0.02	2.1	<1	3	-6.65	-42.4
PTN18	42.00	22/9/15	102	12	84	2	79	14	88	331	<0.05	0.13	<0.02	<1.0	<1	<1	-6.51	-42.8
PTN19	10.00	23/9/15	123	18	46	3	53	93	52	411	<0.05	0.10	<0.02	<1.0	<1	<1	-6.43	-41.4
PTN20	51.00	23/9/15	115	37	32	1	34	46	59	451	0.05	0.10	0.02				-6.38	-40.3
PTN21	80.00	22/9/15	131	21	49	2	74	54	59	385	<0.05	0.11	<0.02	76.1	<1	77	-6.44	-41.6
PTN22	20.00	23/9/15	166	20	30	2	75	57	52	451	<0.05	0.10	<0.02	<1.0	<1	<1	-6.31	-40.3
PTN23	45.50	23/9/15	157	17	32	2	53	46	56	444	<0.05	0.12	<0.02	10.2	<1	11	-6.23	-39.7
PTN24	45.00	22/9/15	140	18	43	2	60	72	46	404	<0.05	0.09	<0.02	13.3	<1	14	-6.39	-40.7
PTN25	72.00	15/9/15	152	27	49	2	95	34	103	441	<0.05	0.15	<0.02	3.0	<1	4	-6.42	-40.3
PTN28	54.70	17/9/15	77	12	36	2	42	11	47	269	<0.05	0.08	<0.02	1.0	<1	<1	-6.47	-41.1
PTN29	57.00	16/9/15	109	15	60	3	69	50	50	360	<0.05	0.07	<0.02	6.2	<1	7	-6.73	-43.2
PTN30	n.n.	17/9/15	62	11	56	3	45	5	62	238	<0.05	0.06	0.05	1.0	<1	<1	-6.50	-40.3
PTN31	n.n.	17/9/15	55	10	62	3	52	4	68	222	<0.05	0.07	0.05	1.0	<1	<1	-6.42	-40.0
PTN32	62.00	22/9/15	112	13	49	2	45	42	41	334	<0.05	0.06	<0.02	34.6	<1	35	-6.92	-44.1
PTN33	60.00	22/9/15	100	14	58	2	59	35	58	332	<0.05	0.08	<0.02	219.5	1.5	221	-6.78	-42.7
PTN36	n.n.	15/9/15	121	17	41	3	43	18	58	438	0.10	0.09	<0.02	1.0	<1	<1	-6.79	-43.6
PTN37	57.00	24/9/15	133	20	43	2	74	38	63	394	<0.05	0.11	<0.02	87.3	<1	88	-6.61	-41.1
PTN38	77.50	24/9/15	134	20	56	2	123	50	59	339	0.05	0.13	0.02	292.4	<1	293	-6.55	-41.8
PTN42	59.00	24/9/15	143	21	46	2	79	51	66	409	<0.05	0.11	<0.02	112.0	<1	112	-6.52	-41.4
PTN44	n.n.	23/9/15	133	18	39	2	63	47	53	368	<0.05	0.11	<0.02	71.2	<1	72	-6.53	-41.1

Tabella 2 – Dati chimici ed isotopici relativi alle due campagne estive, Giugno e Settembre 2015 (n.n.: non nota)

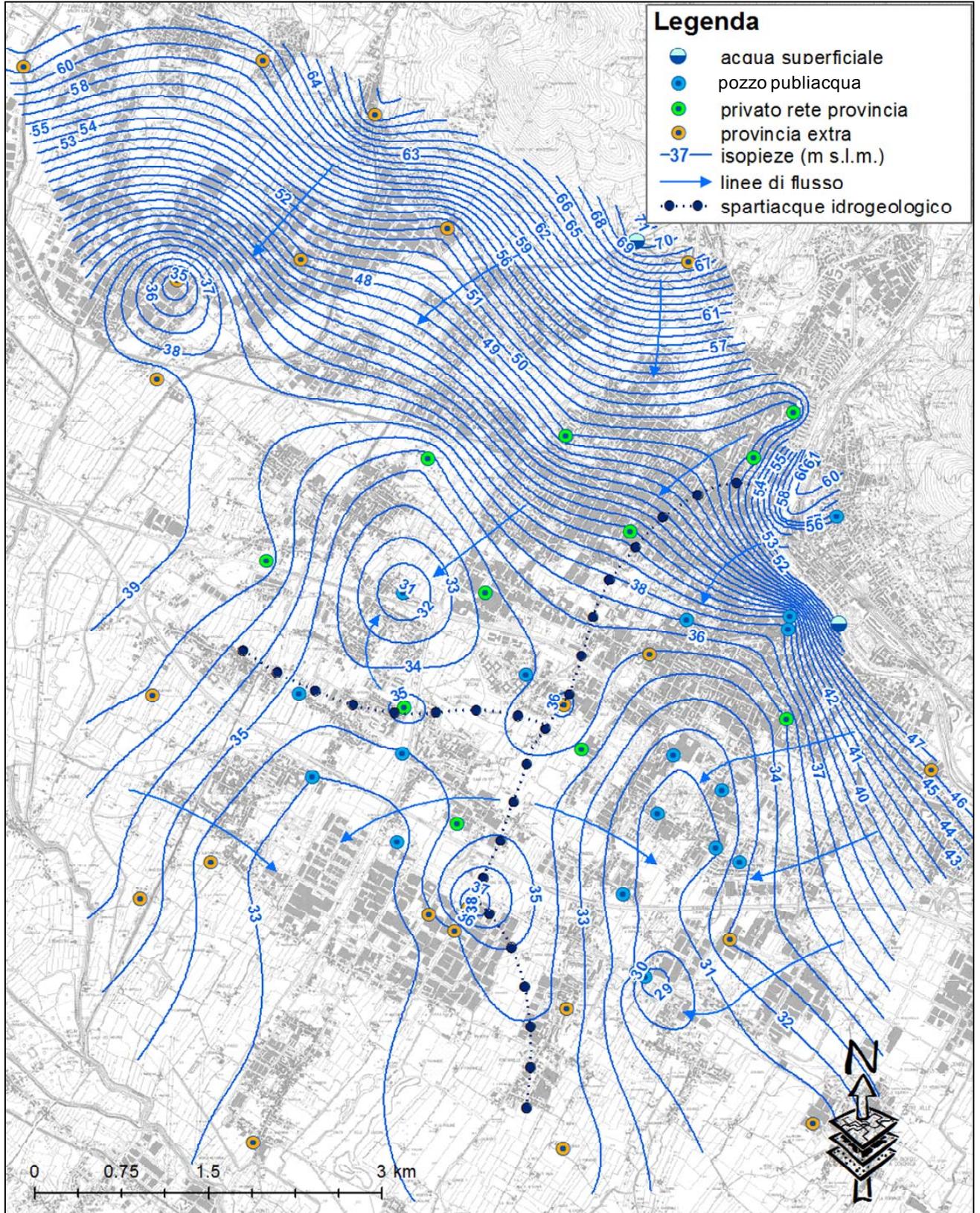


Figura 15 - Piezometria Giugno 2015

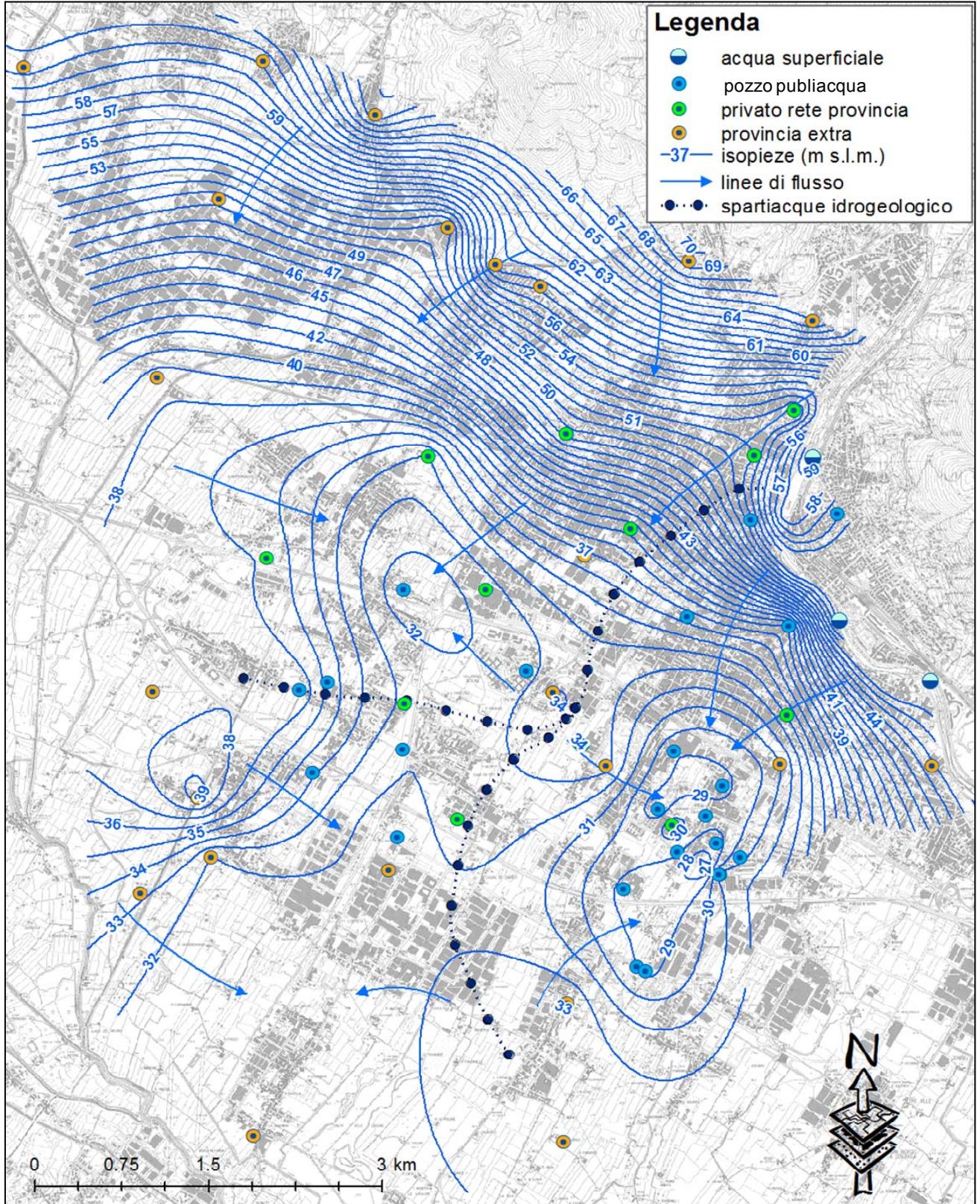


Figura 16 - Piezometria Settembre 2015

Confrontando la piezometria di Giugno 2015 (Figura 15) con quelle del passato (Figura 3) riferibili a condizioni di regime idrologico/idrodinamico paragonabili, si può concludere che il processo di risalita dei livelli, avuto dal 2000 al 2010 come precedentemente sottolineato, sembra essersi esaurito, vista la forte similitudine dei livelli piezometrici, appunto, tra Giugno 2015 e Marzo-Aprile 2010.

Tra Settembre e Giugno 2015 si registra un generale abbassamento dei livelli dell'ordine uno - pochi metri, da rilegare alle diverse condizioni di regime idrologico (pressoché di morbida a Giugno e di magra a Settembre) e di sfruttamento della falda (maggiore nel periodo della seconda campagna).

In entrambe le campagne si rilevano due principali spartiacque idrogeologici dinamici (suscettibili di variazione, poiché almeno in parte determinati da condizioni di sfruttamento e dal rapporto tra queste e l'alimentazione). Il primo spartiacque si sviluppa pressappoco in direzione N-S, nella parte assiale del conoide, il secondo, più evidente nella campagna di Giugno, percorre una direzione W-E nel settore occidentale della piana.

Questi spartiacque favoriscono la ripartizione della circolazione idrica sotterranea in settori tra di loro poco comunicanti e/o comunicanti soltanto in alcuni periodi dell'anno. In particolare, si ha la tendenza ad una separazione tra la circolazione che insiste nel settore orientale rispetto a quella del settore occidentale ed in quest'ultimo una tendenza alla separazione tra la parte Nord e la parte Sud. E' corretto parlare di tendenza, poiché vista la natura idrodinamica di questi spartiacque è lecito attendersi che questi nel tempo si spostino ed oscillino in termini di quota, rendendo comunque possibile, almeno in alcuni periodi dell'anno, un certo scambio idrico tra detti settori (si veda ad esempio la variabilità dell'importanza dello spartiacque W-E tra Giugno e Settembre, che suggerisce la possibile esistenza di periodi in cui questa barriera può venire meno o comunque non separare del tutto il settore Nord da quello Sud).

Rimane comunque il fatto che, in linea generale, come conseguenza di questa conformazione degli spartiacque, le alimentazioni da parte del Fiume Bisenzio e delle zone collinari/montane settentrionali recapitano maggiormente (e non esclusivamente) nel settore orientale della piana ed in quello nord della parte occidentale. Nella zona sud-occidentale possono viceversa avere maggior peso, sia l'infiltrazione locale (quella cioè che si verifica direttamente nei depositi della piana), sia l'alimentazione dalle colline meridionali.

Da un punto di vista chimico tutte le acque analizzate nel corso delle due campagne mostrano un chimismo dominante di tipo bicarbonato alcalino terroso (Figura 17). Sono tuttavia evidenti significative differenze idrochimiche.

In particolare, si osserva una componente relativamente abbondante in magnesio, evidenziata in magenta nella Figura 17 A e B, che è ben riconoscibile nella parte nord-occidentale dell'area investigata, di competenza del Torrente Bardena. Questo settore è di fatto prospiciente alle pendici collinari dove insistono anche i termini ofiolitici delle Unità Liguri e che tipicamente possono

impartire alle acque un chimismo di tipo bicarbonato-calcio/magnesiaco. Di conseguenza vi sono indicazioni, peraltro concordanti con le piezometrie, di un'alimentazione verso la falda pratese da parte di questi rilievi, attraverso il Torrente Bardena e/o direttamente per travaso sotterraneo.

Un altro termine piuttosto ben riconoscibile è quello relativamente arricchito in una componente cloruro-sodica (vedi punti evidenziati in verde nella Figura 17 A). Questa è associata alle acque del Fiume Bisenzio ed a quelle dei pozzi ad esso vicini (Figura 17 B), ottenendo quindi ancora una conferma di quanto indicato dalla piezometria, questa volta a riguardo del significativo ruolo del Fiume Bisenzio nell'alimentazione della falda.

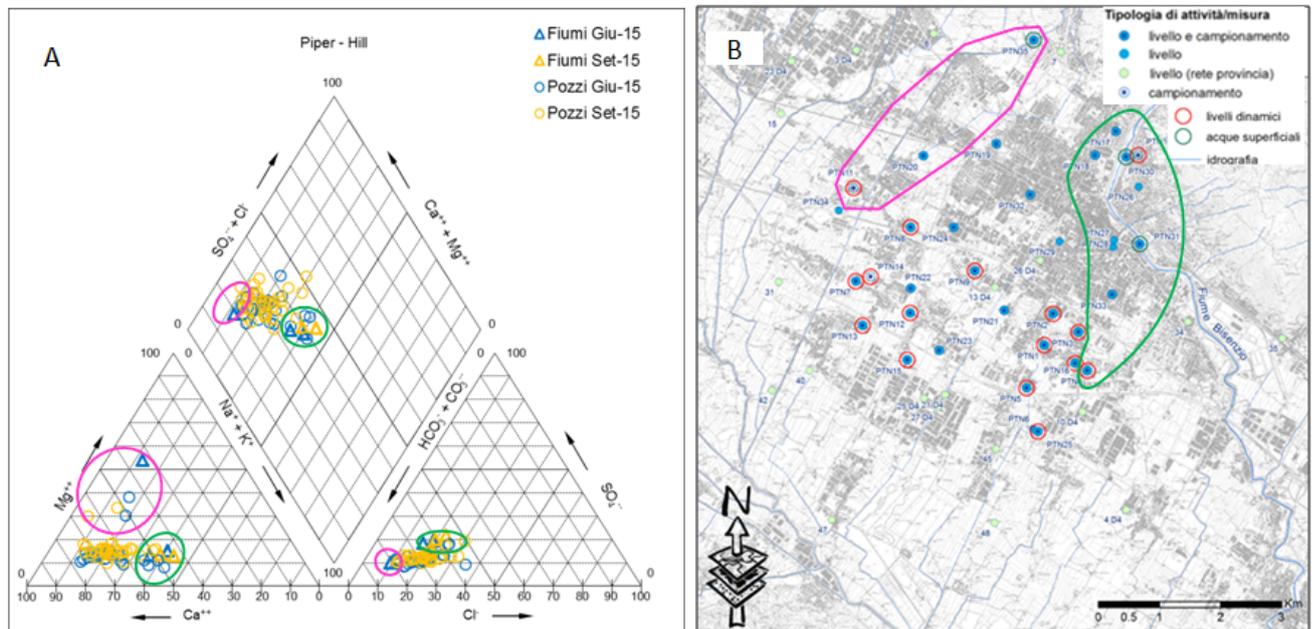


Figura 17 - Diagramma Piper-Hill di classificazione chimica (A) e ubicazione punti di prelievo (B)

La restante parte delle acque mostra caratteristiche più schiettamente bicarbonato-calciche anche se in Figura 17 A si percepisce una loro tendenza a distribuirsi secondo trend che possono interpretarsi o come relative evoluzioni/maturazioni di chimismo, legate ad una progressiva interazione con la parte solida dell'acquifero (a prevalente matrice carbonatica), o a processi di mescolamento.

Anche da un punto di vista degli isotopi stabili dell'acqua si trova corrispondenza con l'assetto piezometrico elaborato. Come ben osservabile dalla Figura 18 A e B, relative alla campagna di Giugno 2015, i valori isotopici più negativi contraddistinguono le acque del Fiume Bisenzio e dei pozzi posti nella zona d'ingresso del fiume nella pianura. Questi segnali isotopici, relativamente negativi, sono legati alle acque provenienti dalle quote elevate del bacino del Bisenzio. L'importante diffusione di queste acque nel sottosuolo della pianura (ad opera del fiume e/o per travaso sotterraneo dai rilievi) è confermata dai contenuti isotopici relativamente negativi che

osserviamo in tutti quei pozzi che si collocano nella parte settentrionale ed orientale della piana stessa (evidenziati in ciano nelle immagini A e B di Figura 18), dove la morfologia della superficie piezometrica è favorevole ad un mantenimento più deciso del segnale isotopico proveniente dalle quote superiori. Nei settori più meridionali ed occidentali, laddove la superficie piezometrica (per presenza di spartiacque idrogeologici e per la forma di alcune depressioni) suggerisce una più limitata possibilità di diffusione dei circuiti provenienti dai settori settentrionale e orientale, si ritrovano viceversa valori isotopici più elevati ed indicativi di quote medie d'infiltrazione più basse.

Come deducibile dal diagramma di Figura 18 A, nel complesso si assiste ad un graduale incremento dei valori isotopici e ciò è da mettere in relazione ad un corrispondente incremento dell'importanza della componente di infiltrazione locale nei confronti di acque provenienti da quote più elevate e recapitate nel sistema per mezzo del Fiume Bisenzio e per travaso sotterraneo dagli acquiferi collinari/montani. Anche l'infiltrazione diretta di acque meteoriche nella piana sembra costituire quindi una voce importante in termini di alimentazione del sistema acquifero.

Il significativo ruolo di questa componente è confermato indirettamente anche dai dati della campagna di Settembre 2015 (Figura 18 C e D). Infatti, in questo periodo si assiste ad un sensibile decremento generale dei valori isotopici, nonché ad una presenza di valori isotopici di competenza del settore più settentrionale, riscontrata nella prima campagna (Giugno 2015), in alcuni pozzi posti più a Sud, anche rispetto allo spartiacque W-E (punti evidenziati in ciano nelle Figura 18 C e D). Questo comportamento è da ricondurre ad una minore azione di sbarramento di tale spartiacque, di cui si è già discusso, ma anche alla ridotta ricarica del sistema nei tre mesi che hanno preceduto la campagna di Settembre 2015. Le precipitazioni che si sono verificate tra Giugno e Settembre, oltre ad essere risultate inferiori rispetto a quelle del periodo che ha preceduto la campagna di Giugno, solo in misura secondaria possono aver raggiunto la falda, dal momento che le temperature del periodo favoriscono un forte tasso di evapotraspirazione (oltre che una maggiore necessità di integrazione della capacità idrica di campo nei suoli). Di conseguenza l'apporto di valori isotopici relativamente più elevati rilegabili alle precipitazioni locali (a livello della piana) risulta meno importante e la componente che si origina da quote più elevate, e che ha un'inerzia maggiore, aumenta percentualmente nel sistema determinando un relativo decremento isotopico nelle acque di falda.

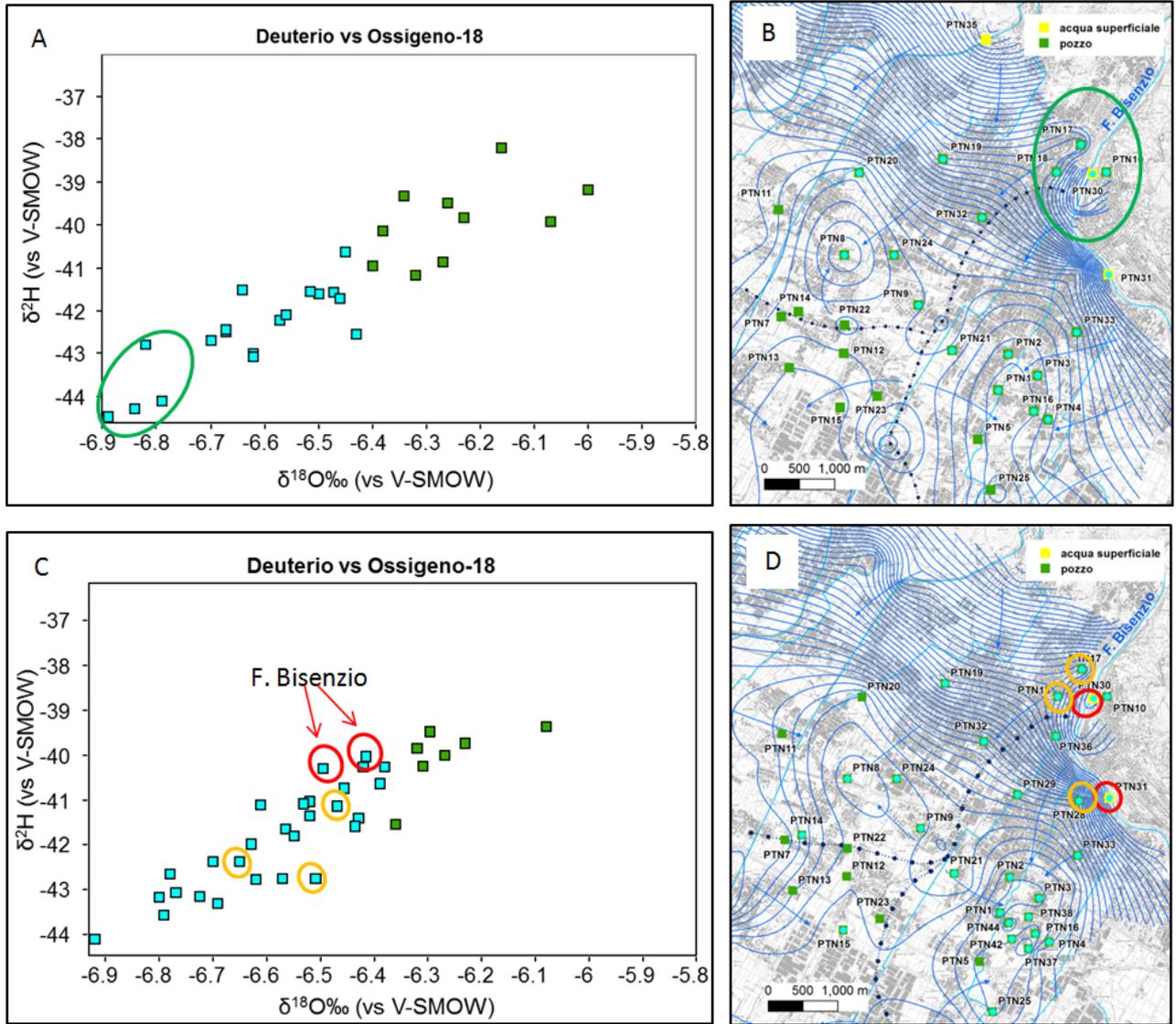


Figura 18 - Diagrammi Deuterio vs Ossigeno-18 per le campagne di Giugno 2015 (A) e Settembre 2015 (C) e ubicazione punti di prelievo con sovrapposte la piezometrie di Giugno 2015 (B) e Settembre 2015 (D)

Un altro aspetto rimarcato dai dati isotopici della seconda campagna è la continuità idraulica tra il Fiume Bisenzio e la falda, con uno scambio idrico essenzialmente a favore di quest'ultima. Di fatto questo corso d'acqua nella campagna di Settembre 2015, in cui il deflusso fluviale risultava ben inferiore a quello della campagna di Giugno 2015, ha mostrato contenuti isotopici decisamente più elevati rispetto al primo periodo di campionamento (cerchi rossi in Figura 18 C rispetto al cerchio verde in Figura 18 A), ciò è da legare, con ogni probabilità, agli apporti delle limitate precipitazioni estive, che come noto risultano statisticamente appesantite da un punto di vista isotopico (valori più elevati di  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  e  $\delta^2\text{H}\text{‰}$ ). A questa variazione isotopica tre dei cinque pozzi posti nelle immediate vicinanze del corso d'acqua (cerchi arancio nelle Figura 18 C e D) hanno risposto in maniera concorde, cioè mostrando un incremento dei valori isotopici nelle acque da loro intercettate, a conferma di una partecipazione (ovviamente più importante nei periodi in cui il

fiume ha un livello idrometrico maggiore) delle acque del Bisenzio nell'alimentazione della circolazione idrica sotterranea del conoide di Prato.

Per quanto riguarda i contaminanti oggetto di questo studio (nitrati e tetracloroetilene), le loro concentrazioni non sembrano in linea generale avere una diretta relazione con la profondità (Figura 19). C'è tuttavia da evidenziare che i valori di quest'ultimo parametro sono stati dedotti dalla profondità raggiunta dai pozzi e che spesso uno stesso pozzo drena le acque sotterranee contemporaneamente da più intervalli di quota, visto che l'analisi delle stratigrafie e dei disponibili schemi di condizionamento dei pozzi evidenzia come la pratica della multifenestrazione sia molto diffusa a livello dell'intera area.

La contaminazione in nitrati sembra essere diffusa più o meno a livello di tutta l'area indagata, quindi per questo parametro non è evidente neppure una relazione tra concentrazione e ubicazione dei pozzi sul territorio (Figura 19). Viceversa, per il tetracloroetilene si osservano aree con maggiori concentrazioni del contaminante, rispetto ad altre dove tali concentrazioni risultano molto basse (Figura 21).

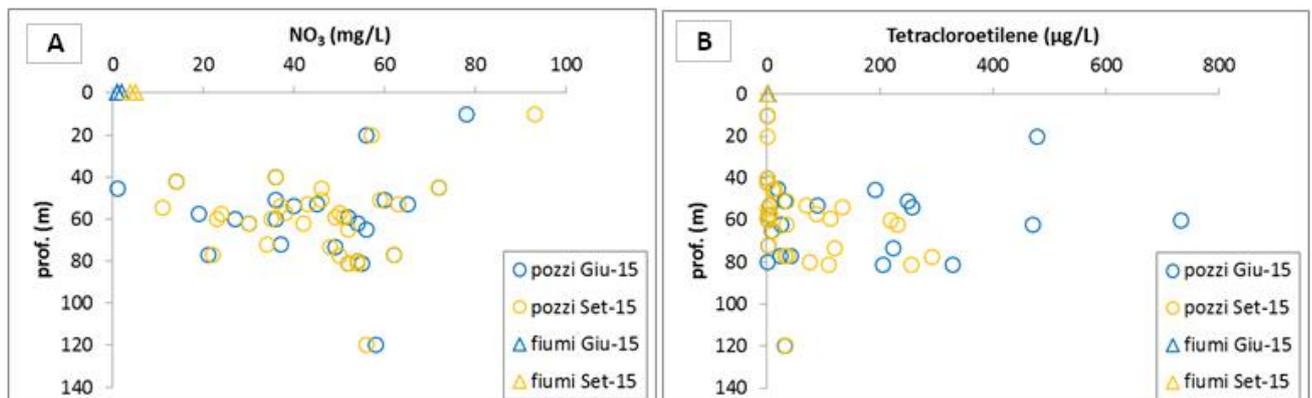


Figura 19 - Contenuti in nitrati (A) e tetracloroetilene (B) nei confronti della profondità

Mentre per i nitrati non si assiste a marcate variazioni di concentrazione tra Giugno e Settembre, per il tetracloroetilene (Figura 19 B e Figura 21) si verifica una generale decremento nella seconda campagna e questo aspetto è maggiormente evidente nel settore centro occidentale dell'area di studio. Anche se in via del tutto preliminare, questo sembra indicare l'esistenza di una relazione tra condizioni idrodinamiche e concentrazioni di tetracloroetilene (livelli e gradienti più alti, maggiore concentrazione del contaminante).

Anche il confronto tra contenuti di tetracloroetilene ed isotopi dell'acqua sembra aggiungere un elemento di conferma sulle relazioni tra concentrazioni del contaminante e condizioni idrodinamiche. Di fatto dal diagramma di Figura 22 si osserva che ad un generale decremento del tetracloroetilene tra Giugno e Settembre corrisponde un generale decremento dei contenuti isotopici che, come trattato precedentemente, è essenzialmente rilegabile alla mancanza, o comunque alla minima importanza, dell'infiltrazione locale nel periodo estivo.

Tutti questi aspetti sembrano suggerire la presenza, la presa in carico da parte dell'acqua e la diffusione del contaminante tetracloroetilene essenzialmente nelle parti alte del sistema acquifero. Secondo questa ipotesi le concentrazioni comunque relativamente elevate riscontrate anche nelle acque dei pozzi più profondi sarebbe da attribuire al fatto che detti pozzi essendo multifenestrati drenano contestualmente da livelli produttivi posti a quote più elevate ed a quote inferiori.

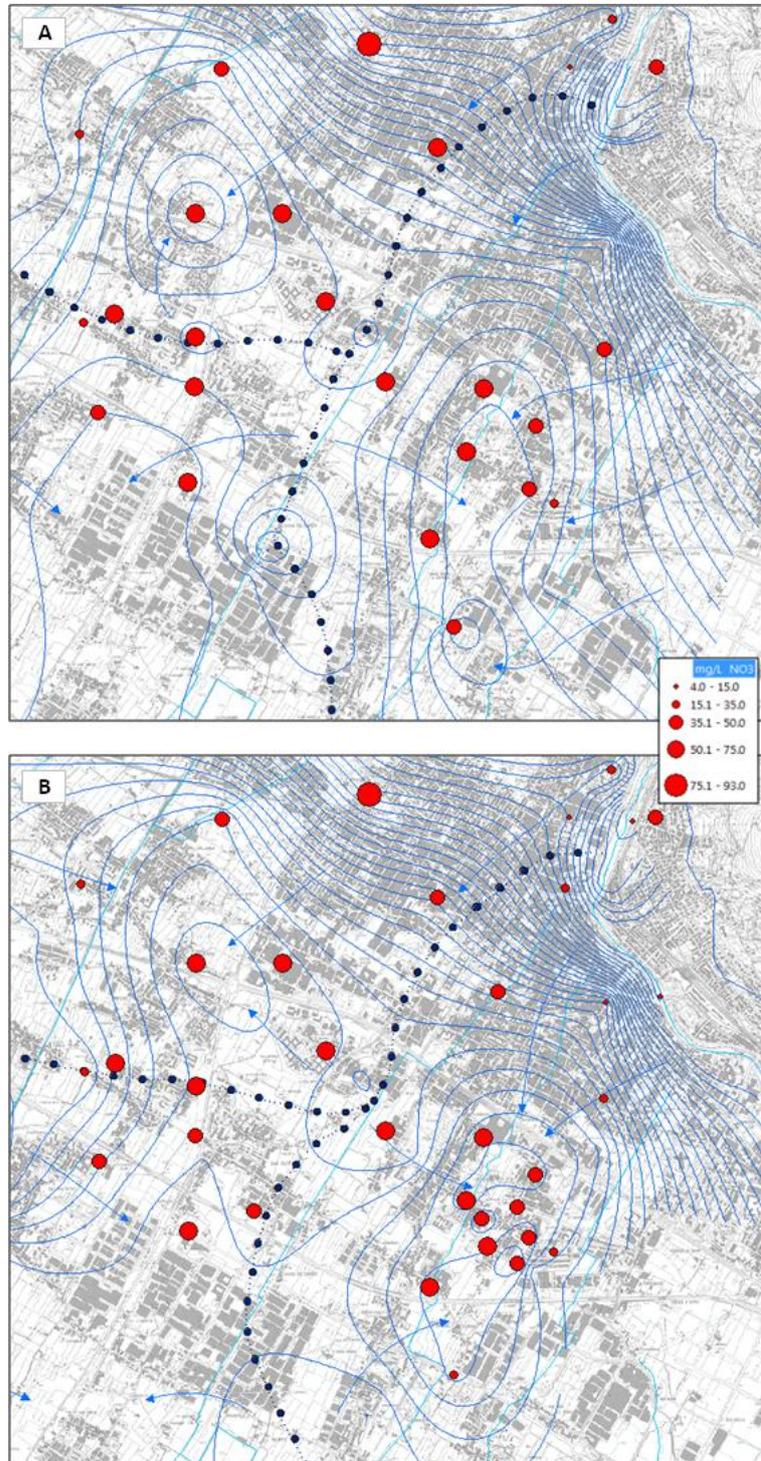


Figura 20 - Mappa dei contenuti in nitrati di Giugno 2015 (A) e Settembre 2015 (B) con sovrapposte le rispettive piezometrie

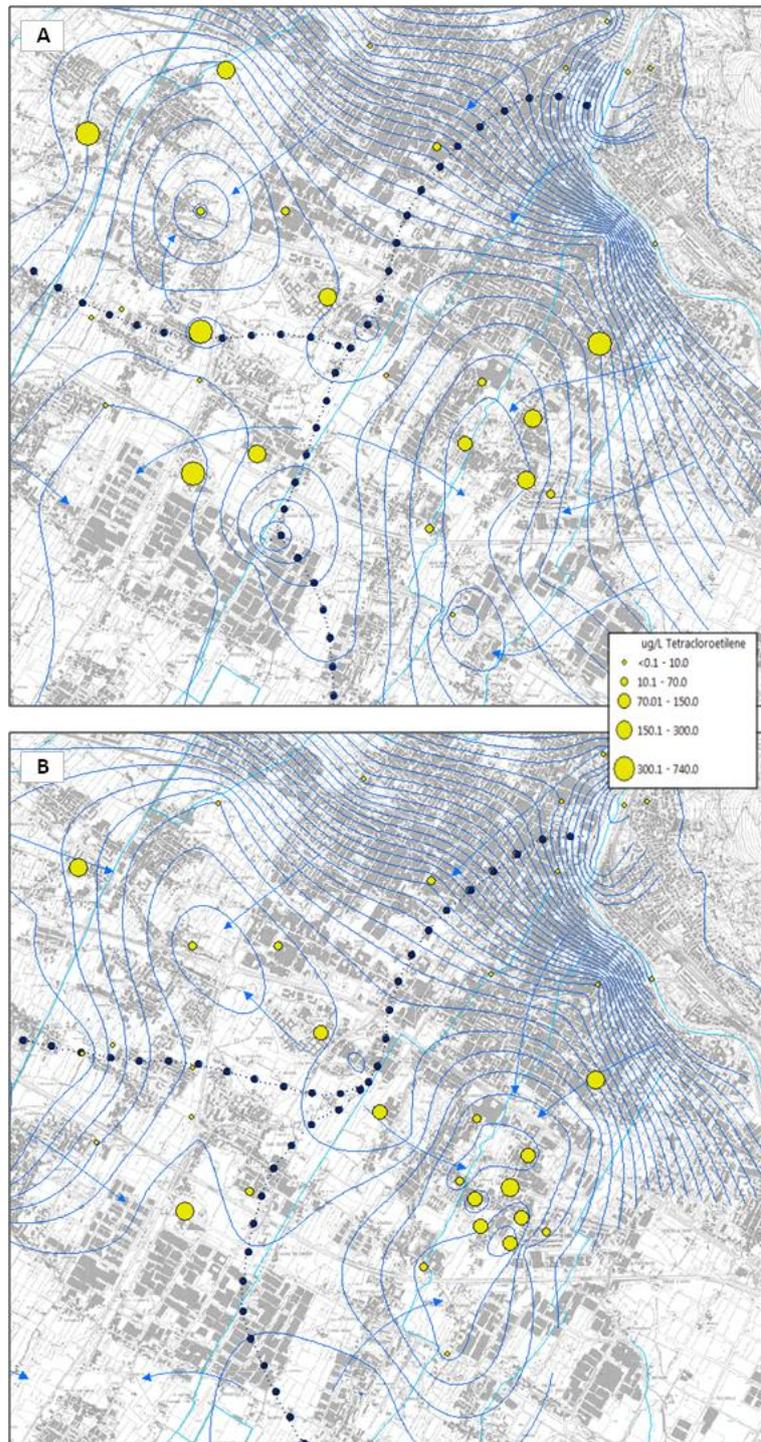


Figura 21 - Mappe dei contenuti in tetracloroetilene di Giugno 2015 (A) e Settembre 2015 (B) con sovrapposte le rispettive piezometrie.

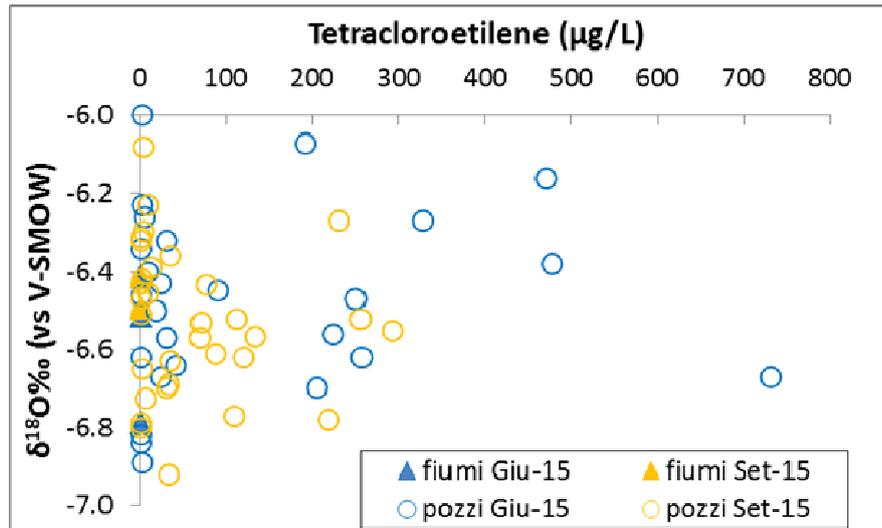


Figura 22 – Confronto tra concentrazioni di tetracloroetilene e valori di  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ .

## 5.2 INDAGINI CON PERTURBAZIONE IDRODINAMICA

Come accennato precedentemente, sono stati eseguiti due test con perturbazione idrodinamica. Durante i test, effettuati in collaborazione con Publiacqua e Ingegnerie Toscane, si sono alternati periodi di attività e di spegnimento di una serie di pozzi, contestualmente si è seguita l'evoluzione dei parametri chimico-fisici, chimici ed isotopici delle acque di tali pozzi.

### Test 15-28 Ottobre 2015

Nel corso della seconda metà di Ottobre 2015 sono state interrotti per 5 giorni consecutivi gli emungimenti di una serie di pozzi idropotabili nella zona Badie. Precedentemente all'interruzione, ovvero il giorno 15 Ottobre, si è eseguita una campagna finalizzata a definire le condizioni di livello idrico e chimico-isotopiche delle acque della zona. Nel corso dei cinque giorni di inattività di detti pozzi (16 - 20 Ottobre) si è provveduto a misurare livelli ed a campionare (attivando un pozzo alla volta per 10 minuti) quotidianamente. Queste attività sono inoltre proseguite anche dopo la riaccensione definitiva del campo pozzi, sull'arco temporale 21-28 Ottobre. Sull'intero periodo sono stati inoltre monitorati in continuo i livelli del piezometro Badie (PTN43) e dei pozzi Fiorentina 1 (PTN3) e Badie 2bis (PTN39, sprovvisto di pompa).

In Figura 23 è riportata l'ubicazione dei punti presi in esame nel corso di queste indagini, nonché il quadro temporale riassuntivo delle attività svolte e dello stato di attività dei pozzi.

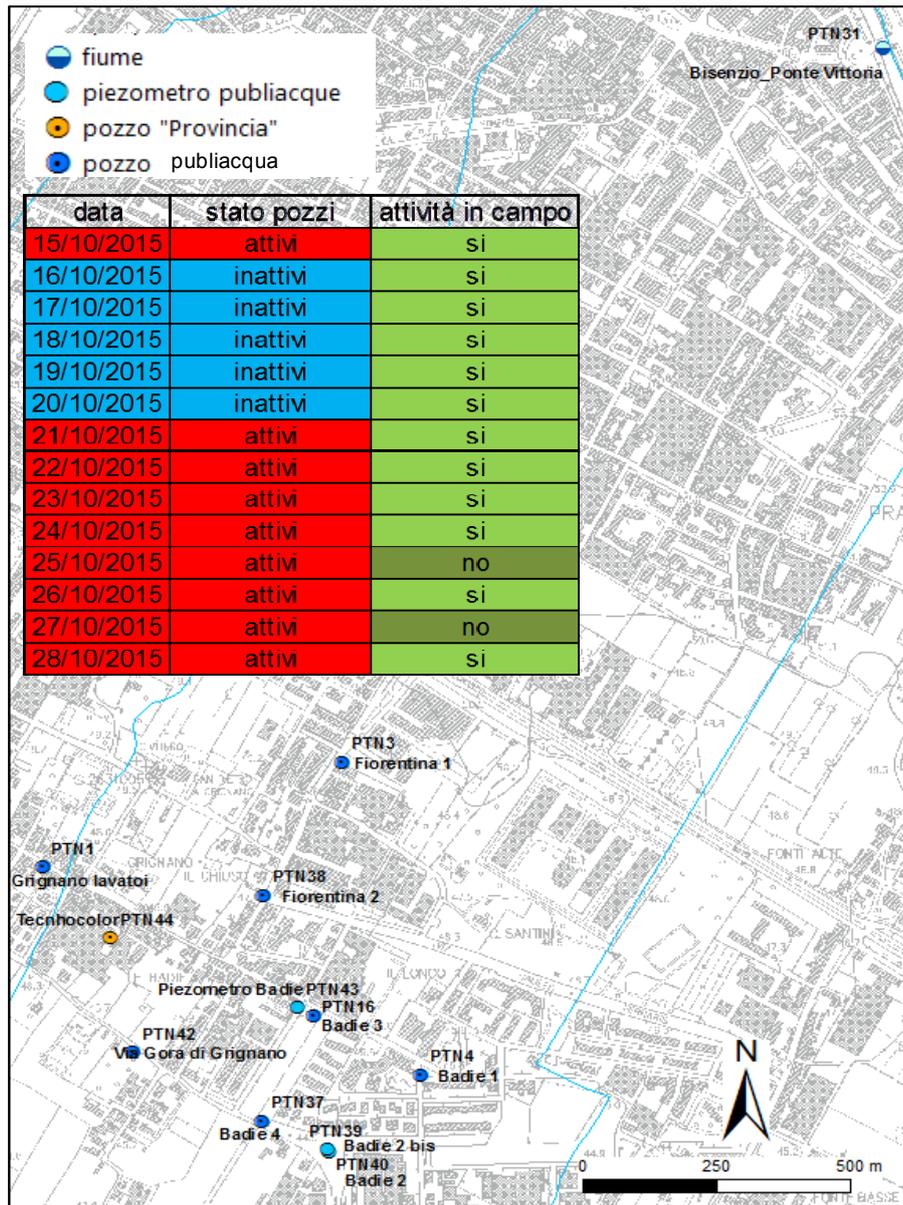


Figura 23 - Punti presi in esame e cronoprogramma delle attività nel corso del test

Oltre ai pozzi ed i piezometri della zona Badie, è stato preso in esame il Fiume Bisenzio all'altezza del Ponte alla Vittoria, nonché le acque piovane raccolte tramite pluviometro appositamente installato presso il pozzo Badie3 (PTN16). Questo perché nei giorni immediatamente precedenti e nel corso dei primi due periodo test si sono verificate precipitazioni significative, ed era opportuno verificarne il segnale isotopico, qualora questo avesse influenzato nel breve periodo i contenuti isotopici delle acque di falda. Di fatto le piogge raccolte (così come mostrato anche dalle acque del Bisenzio in risposta alle precipitazioni) sono risultate decisamente più negative ( $\delta^{18}O\%$  circa -7.7) rispetto al valore di base (15 Ottobre, pre-test) delle acque sotterranee ( $\delta^{18}O\%$  tra -6.5 e -6.8), e non si è registrato in quest'ultime un'evoluzione verso tali valori più negativi. Si può di conseguenza concludere che nel breve periodo della prova dette precipitazioni non hanno raggiunto le acque sotterranee della zona test né direttamente (infiltrazione diretta), né indirettamente (per mezzo del Bisenzio).

In Figura 24 si riportano le stratigrafie e le quote dei filtri dei pozzi e piezometri Publiacqua presi in esame.

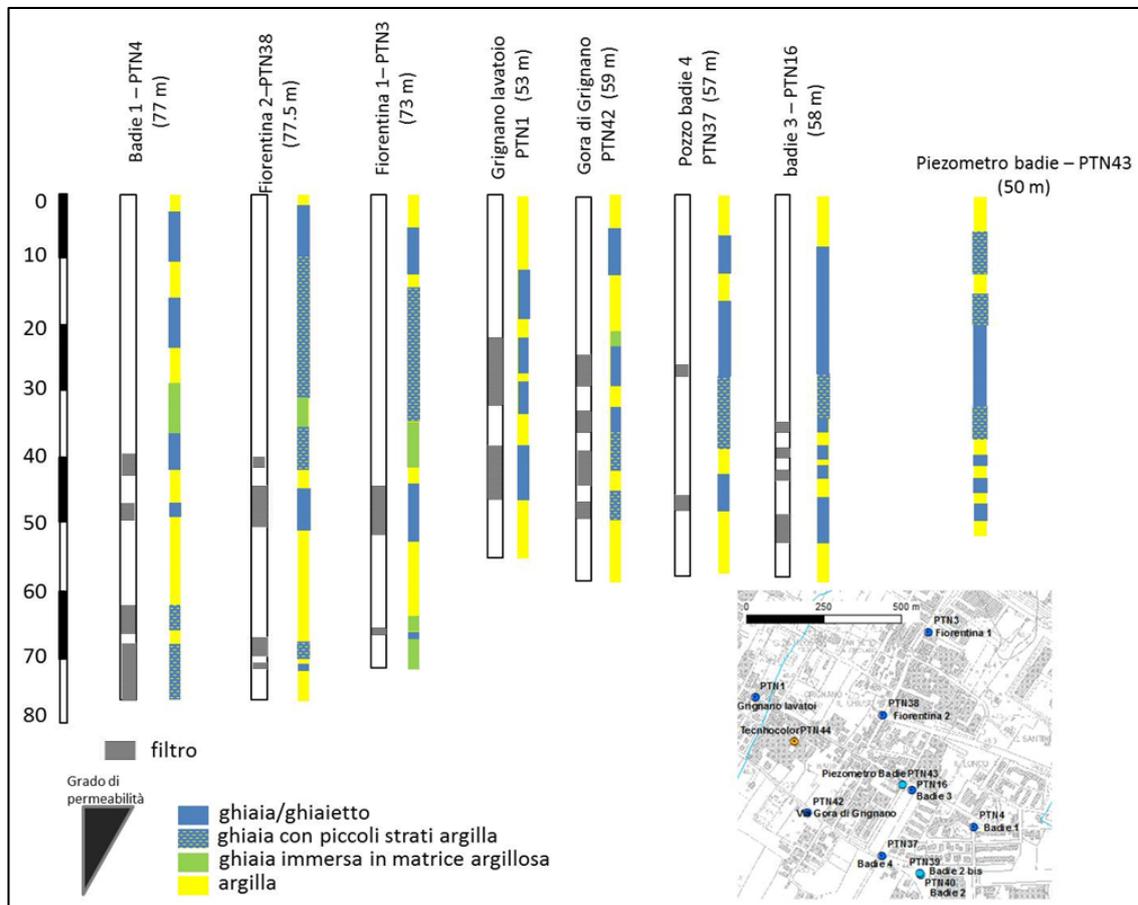


Figura 24 - Stratigrafie e quote filtri dei pozzi e piezometri Publiacqua in zona test.

Dalla figura si evince come nella zona del test ci siano un primo raggruppamento di pozzi attestati su profondità di 50-55 metri, ed un secondo con pozzi che raggiungono le profondità di 70-75 metri. Tutti i pozzi risultano multifenestrati, ovvero drenare più orizzonti acquiferi simultaneamente. Basandosi sulle stratigrafie a disposizione, dei tre pozzi più profondi soltanto uno (Badie 1 - PTN4) risulta poter intercettare una significativa circolazione in profondità (livello acquifero tra 65 e 75 metri di profondità), mentre per gli altri due (Fiorentina 1 - PTN3 e Fiorentina 2 - PTN38) le acque erogate sono in parte preponderante rappresentative degli orizzonti acquiferi più superficiali, in analogia alla restante parte dei pozzi esaminati nella zona.

Da un punto di vista piezometrico l'intera area ha mostrato una omogenea risposta alla perturbazione idrodinamica indotta dallo spegnimento del campo pozzi idropotabile (periodo 16 mattina - 21 mattina). Infatti, sia dall'andamento dei livelli piezometrici misurati quotidianamente nei vari pozzi, sia da quello dei livelli registrati in continuo su Fiorentina 1 (PTN3) e Badie 2bis (PTN39) le variazioni di livello sono risultate concordanti nei tempi e nelle ampiezze nei vari pozzi (Figura 25). L'unica eccezione riguarda il piezometro Badie (PTN43) che mostra variazioni pressoché

trascurabili; tenuto conto della profondità del piezometro, della stratigrafia da questo attraversata e della sua ubicazione (Figura 24), la spiegazione di questo anomalo comportamento rispetto ai pozzi vicini è verosimilmente da ricercare in un'inefficienza idraulica dell'opera maturata nel tempo (si ricorda infatti che l'opera è antecedente gli anni settanta e che da molti anni non è interessata da operazioni di spurgo).

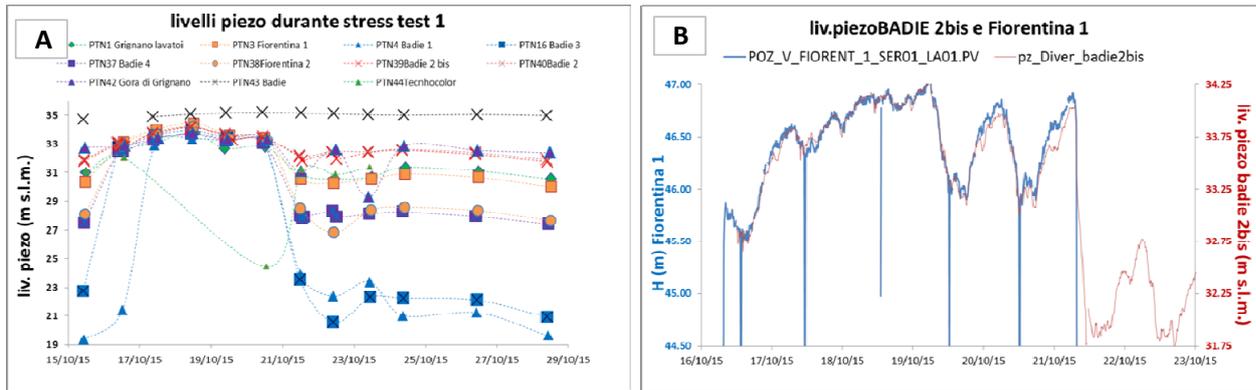


Figura 25 - Evoluzione dei livelli idrici nei pozzi nel corso del test. A: misure giornaliere; B: misure di monitoraggio in continuo (NB: per Fiorentina 1 sono riportate le altezze H di colonna d'acqua sopra la sonda di registrazione e non i livelli piezometrici).

Sempre dai diagrammi di Figura 25, e più in particolare da quello di Figura 25 B, è possibile concludere che nella zona del test hanno influenza sui livelli, non solo i pozzi presi in esame nel corso del test stesso, ma anche altri pozzi, visto che nel periodo di inattività (16 mattina-21 mattina) si sono registrati oscillazioni significative dei livelli nel corso delle ore diurne.

L'omogenea risposta riscontrata a livello dell'intera area test, e su pozzi aventi profondità differenti, porta a pensare ad una omogeneità delle caratteristiche idrauliche nella porzione di sistema acquifero indagata. Nel caso l'orizzonte acquifero più profondo avesse proprietà idrauliche marcatamente differenti a quelle degli orizzonti più superficiali, sarebbe infatti stato da attendersi, in particolar modo nei tempi di risposta, comportamenti significativamente diversi tra pozzi più superficiali e pozzi più profondi.

Marcate differenze di abbassamento dei livelli sono invece riscontrabili tra i vari pozzi nelle quando questi sono in emungimento (Figura 25 A il 15 Ottobre e dopo la riaccensione del campo pozzi nel periodo 21-28 Ottobre). Queste in parte sono si dovute alle diverse portate dei pozzi, ma anche alle forti perdite di carico che sembrano interessare alcune di queste opere di captazione (indifferentemente se superficiali o profonde). Questo aspetto è bene evidenziabile sul diagramma di Figura 26 dove si osservano abbassamenti ben diversi a parità di portata ed il fatto che dati relativi al periodo di realizzazione di alcuni pozzi (Badie 1, Fiorentina 1 e Fiorentina 2) mostrano come all'epoca l'efficienza di queste opere fosse ben più elevata.

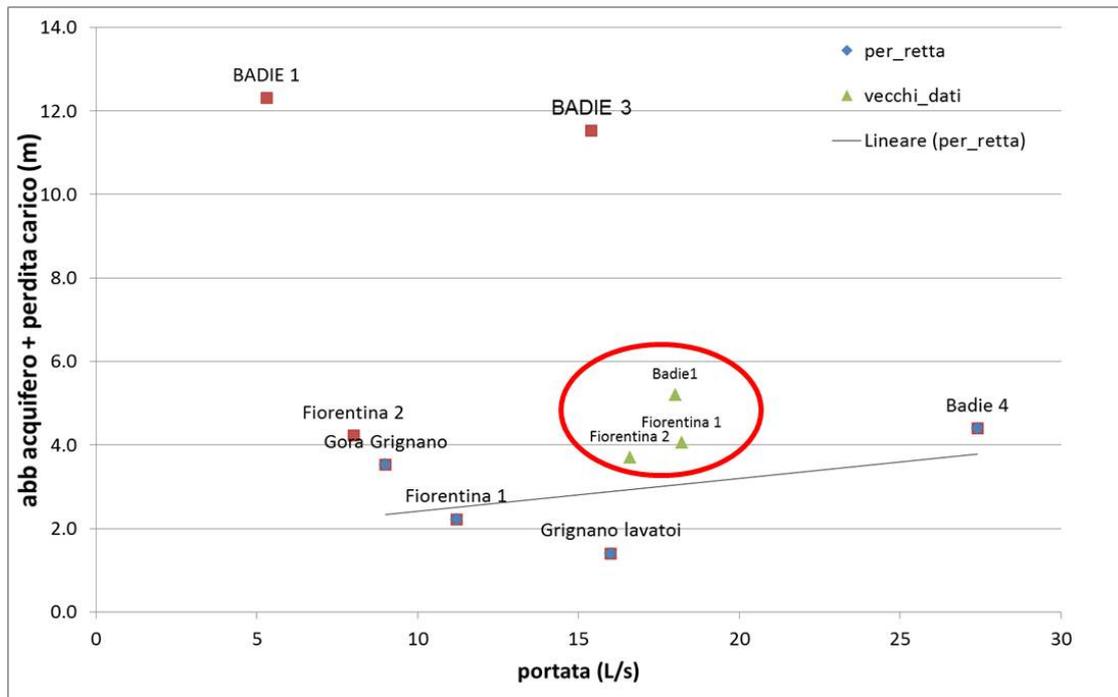


Figura 26 - Abbassamenti dei livelli nei vari pozzi confrontati con le relative portate di emungimento.

Tenuto conto anche di questi aspetti, in definitiva le caratteristiche idrauliche del sistema acquifero sono da ritenersi omogenee nella zona del test.

Al fine di procedere ad una stima delle proprietà idrauliche è stato utilizzato il set di dati di monitoraggio in continuo registrato al pozzo/piezometro Badie 2bis (PTN39) nel corso delle prime ore dalla riaccensione del campo pozzi (successivamente a questo breve periodo si nota infatti un incremento degli abbassamenti rilegabile alla riapertura delle attività industriali della zona, e non conoscendo né portate né ubicazioni di questi emungimenti non è stato possibile estendere nel tempo l'elaborazione). In particolare è stato supposto un pozzo unico di emungimento avente una portata totale corrispondente alla somma di tutte le portate dei pozzi della zona ed ubicato come baricentro di massa, in funzione delle portate parziali dei singoli pozzi. Da questa elaborazione si ottengono valori di trasmissività (T) e coefficiente d'immagazzinamento (S) di circa  $8.9E^{-03} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $2.7E^{-04}$ , rispettivamente. Questi dati sono stati poi applicati alle formule idrodinamiche per il calcolo degli abbassamenti che si dovevano attendere al pozzo/piezometro Badie 2bis per l'effetto dei diversi emungimenti dai vari pozzi. La somma dei vari abbassamenti così ottenuti è stata infine confrontata con i reali abbassamenti registrati in detto pozzo/piezometro (Figura 27), ottenendo una forte congruenza tra il dato misurato e quello modellizzato, a testimonianza di una buona rappresentatività dei parametri idraulici calcolati.

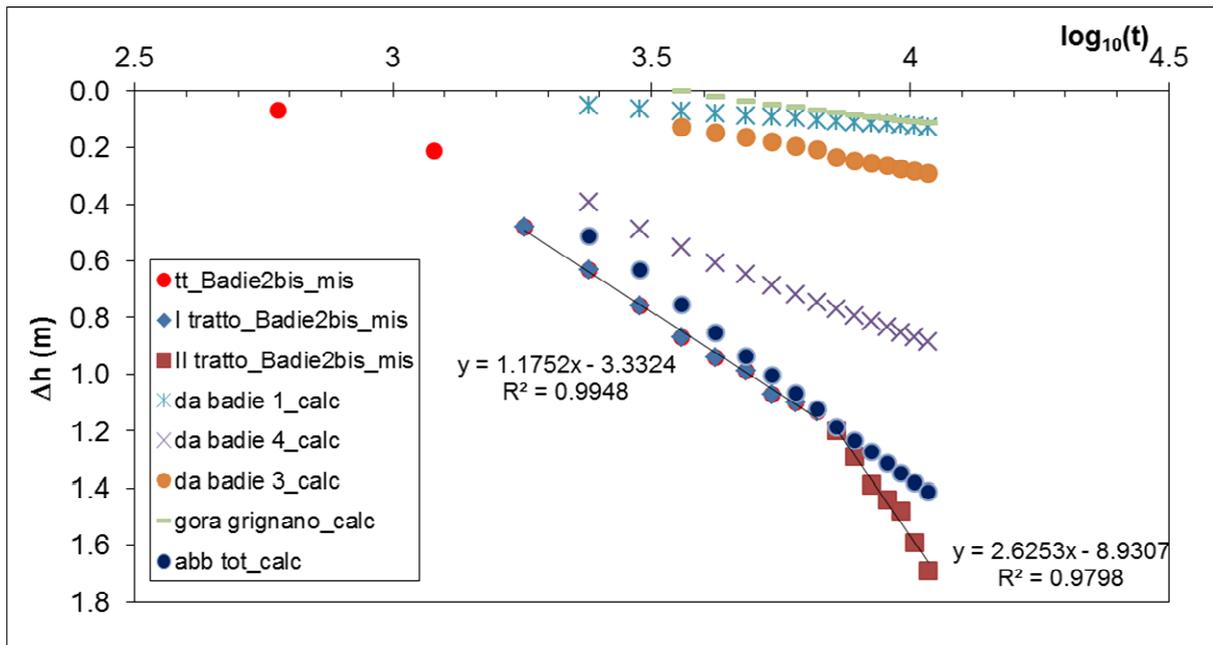


Figura 27 - Diagramma abbassamenti vs log tempo utilizzato per la verifica dei parametri idraulici (NB: il primo tratto degli abbassamenti misurati è del tutto confrontabile con gli abbassamenti totali calcolati).

Di questi parametri idraulici e delle perdite di carico (Figura 26) dovute alle opere di captazione si è tenuto conto al fine di depurare dalla parte rilegabile, appunto, a queste perdite di carico, la misura piezometrica eseguita nei pozzi quando attivi (anche per le campagne estese, come precedentemente specificato).

Tenendo anche conto di quanto sopra, sono state elaborate (Figura 28) le superfici piezometriche della zona test sia per il giorno 15 Ottobre (campo pozzi attivo) sia per il giorno 18 Ottobre. In quest'ultimo caso, è stata effettuata un'elaborazione da ritenersi rappresentativa di una piezometria in condizioni effettivamente statiche (Figura 28 B; campo pozzi spento ed emungimenti industriali presumibilmente assenti, trattandosi di un sabato), nonché due elaborazioni (Figura 28 C e D) in cui si considerano i livelli dinamici rispettivamente dei pozzi Badie 1 (PTN4) e Badie 4 (PTN37) registrati a seguito dei 10 minuti di emungimento in occasione del campionamento del 18 Ottobre previsto dal programma di indagine. Per non trascurare del tutto gli effetti della zona al contorno dell'area test, nelle elaborazioni sono stati inclusi alcuni pozzi circostanti, misurati circa un mese prima nel corso della campagna estesa di Settembre. Per aggiornare al momento del test, queste misure al contorno sono state corrette della variazione generale osservata in quest'area tra la campagna estesa ed il 15 Ottobre (pre-test).

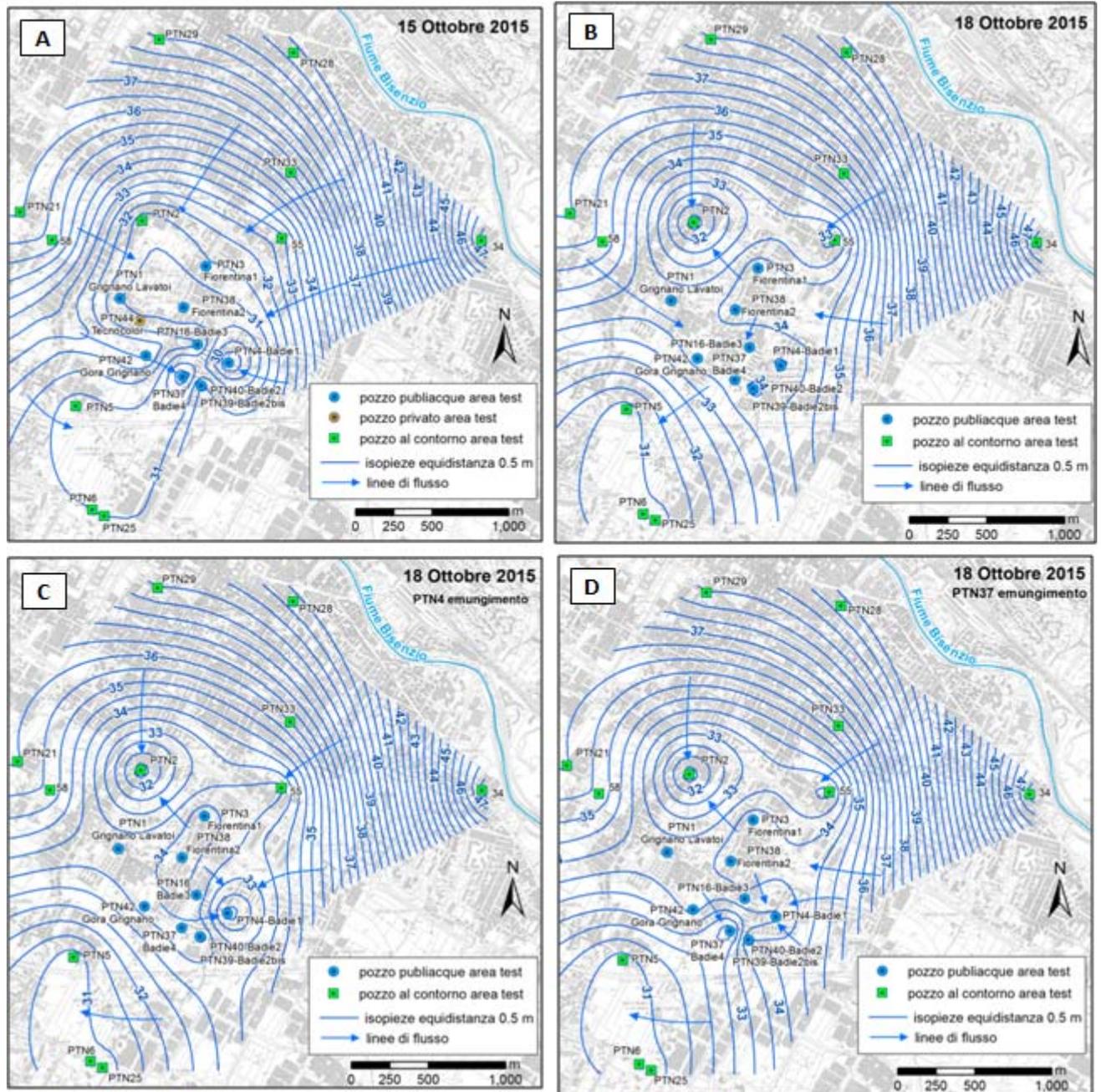


Figura 28 - Piezometrie della zona test in condizioni dinamiche (A) e statiche (B), “statiche” con il solo pozzo PTN4 in emungimento (C) e “statiche” con il solo pozzo PTN37 in emungimento (D)

Da sottolineare che tra il pre-test (15 Ottobre 2015, Figura 28 A) e la campagna estesa di Settembre 2015 (condotta meno di un mese prima Figura 29 B), quindi in condizioni analoghe con campo pozzi attivo, la morfologia della superficie piezometrica nella zona test risulta significativamente diversa; sono peraltro molto più simili, sempre in termini morfologici, le piezometrie di Giugno e Settembre 2015 (Figura 29 A e B). Suddetta differenza è essenzialmente da ricondurre al comportamento anomalo (rispetto agli altri pozzi) del pozzo Badie 1 (PTN4) che il 15 Ottobre (ma anche il 19 e 20 Ottobre dopo i 10 minuti di riaccensione per il prelievo campione in fase campo pozzi inattivo) ha mostrato un livello dinamico di alcuni metri più basso rispetto a tutti i restanti valori di livello dinamico raccolti su questo pozzo (Giugno, Settembre e gli altri giorni di Ottobre durante il test).

Tenuto conto che il Badie 1 (PTN4) mostra una elevata perdita di carico legata all'opera di captazione (si veda Figura 26) e che nel periodo test e pre-test sono state eseguite alcune manovre sulla rete di distribuzione che possono aver sensibilmente alterato le condizioni di pressione nella rete stessa, tale comportamento potrebbe esser dovuto a sensibili variazioni delle portate di emungimento con enfattizzazione delle perdite di carico del pozzo. Purtroppo non è stato possibile stimare con buona approssimazione queste perdite di carico, causa la mancanza del dato di portata dei pozzi della zona test nel periodo in cui quest'ultimo si è svolto. Di conseguenza la configurazione piezometrica di Figura 28 A potrebbe risultare meno rappresentativa della condizione dinamica rispetto ad esempio a quella riferita ai giorni 24-25 Settembre (seconda campagna estesa Figura 29 B).

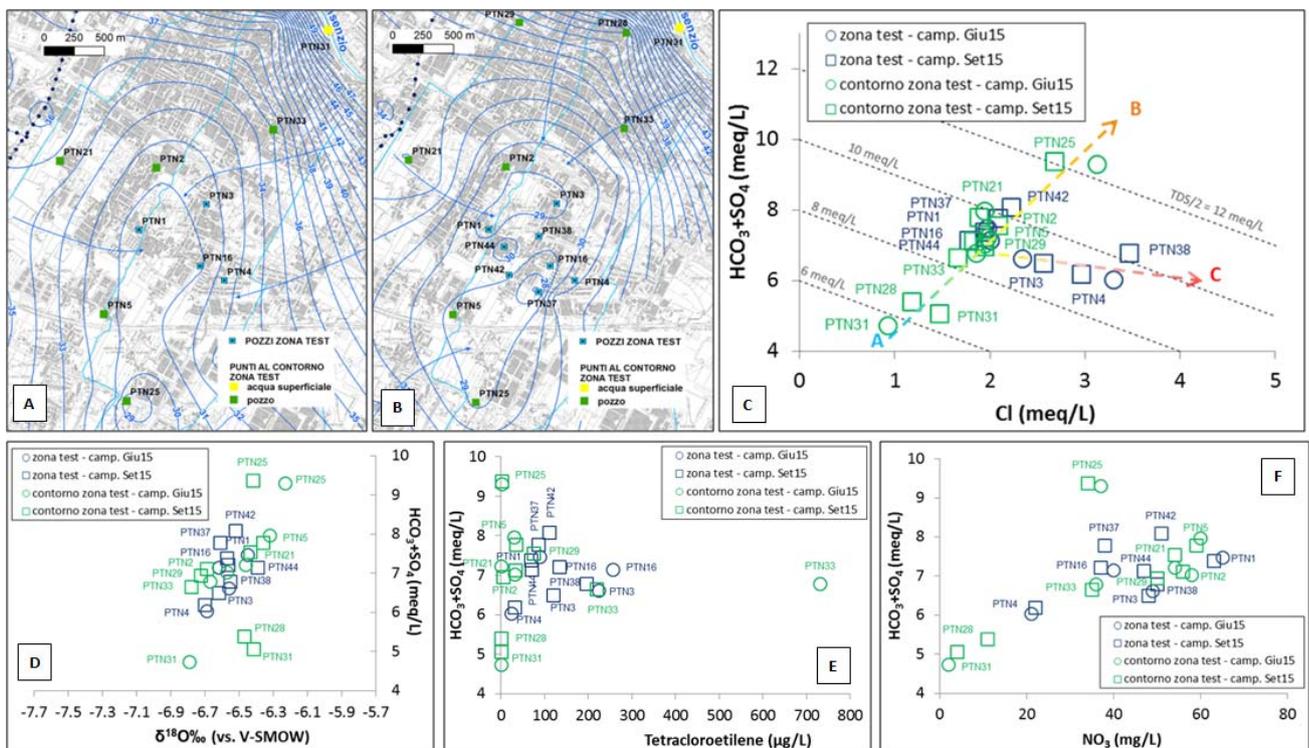


Figura 29 - Assetti piezometrici riscontrati in zona test e dintorni durante le campagne estese di Giugno (A) e Settembre 2015 (B) e diagrammi comparativi  $HCO_3+SO_4$  vs Cl (C)  $HCO_3+SO_4$  vs  $\delta^{18}O_{\text{‰}}$  (D),  $HCO_3+SO_4$  vs Tetracloroetilene (E),  $HCO_3+SO_4$  vs  $NO_3$  (F), relativi ai campioni prelevati nel corso delle due campagne estese in zona test e dintorni.

Effetto Badie 1 (PTN4) a parte, come si osserva dalle Figura 28 A e B, tra il pre-test (15 Ottobre, campo pozzi attivo) ed il giorno centrale del periodo di inattività del campo pozzi (18 Ottobre), si verifica una generale risalita della piezometrica dell'ordine dei 3-4 metri. Conseguentemente nella zona test si ha una decisa decrescita dei gradienti idraulici venendo meno le depressioni piezometriche determinate dagli emungimenti. Si osserva inoltre che nei due esempi riportati nelle Figura 28 C e D l'effetto dell'emungimento del singolo pozzo in occasione dei campionamenti in fase "campo pozzi inattivo" determina un richiamo di acqua da parte del pozzo stesso anche da settori che a campo pozzi attivo recapitano principalmente su altri pozzi (confronta le Figura 28 D e

C con la Figura 29 B). Di fatto sia Badie 1 (PTN4) sia Badie 4 (PTN37), quando attivati singolarmente sembrano richiamare quantità significative anche dal settore ad Ovest degli stessi, mentre a campo pozzi attivo queste captazioni sembrano ricevere acqua principalmente da Est e Nord-Est e, in misura minore, da Sud.

Prima di discutere il comportamento chimico ed isotopico dei vari pozzi durante il test, al fine di inquadrare le possibili componenti in gioco si mettono a confronto in Figura 29 dati chimici ed isotopici ottenuti nel corso delle due campagne estese (Giugno e Settembre 2015) e riguardanti gli stessi pozzi della zona test ed alcuni pozzi al contorno.

Come evidenziato dal diagramma di Figura 29 C, i dati chimici suggeriscono l'esistenza di tre componenti in gioco nella zona del test. Una prima componente, indicata con **A**, è riferibile alle acque del Bisenzio (PTN31). Questa componente, che congruentemente alle piezometrie (Figura 29 A e B) ed alla similitudine chimica delle acque del pozzo PN28 (prossimo al Bisenzio) con quelle del fiume, entra in falda dal settore N-NE rispetto alla zona test, evolve chimicamente aumentando la salinità (di fatto in questo diagramma le linee in tratteggio sono indicative del "TDS Total Dissolved Solids)/2") per un incremento delle concentrazioni del termine  $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$  e, in quantità sensibilmente maggiore, dei cloruri, dovuto almeno in parte ad un'interazione tra acqua e matrice solida dell'acquifero e ad eventuali composti di natura antropica. Questa evoluzione, che è evidenziata dall'allineamento tra la maggior parte dei pozzi presenti nella zona, risulta enfatizzata dalla probabile presenza di una seconda componente, denominata **B**, e da un suo mescolamento con la componente **A** o con un termine già chimicamente evoluto di questa componente. L'esistenza di una componente **B**, caratterizzata dai massimi valori della somma  $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$  nella zona, è da ritenersi molto probabile per il fatto che tutti i pozzi che ne rappresentano la massima espressione (PTN25-42-21-2) si collocano sul quadrante Ovest rispetto al minimo piezometrico determinato dall'insieme degli emungimenti del campo pozzi, ovvero nel settore opposto a quello più di competenza della componente **A** (Figura 29 A-B-C). E' quindi poco probabile che i pozzi che si pongono più in alto nell'allineamento **A-B** di Figura 29 A rappresentino un'evoluzione chimica di una componente che nasce con le caratteristiche della componente **A**, mentre è verosimile che quest'ultima vada a miscelarsi lungo l'asse di massima depressione piezometrica con la componente **B** proveniente dal quadrante Ovest, dando origine ad acque con caratteristiche intermedie tra **A** e **B**, intercettate da quei pozzi che risultano più prossimi a questa zona di mescolamento (es. PTN37-16-44). Una terza componente, denominata **C**, è evidentemente caratterizzata da una abbondanza relativa di cloruri a parità di salinità con altre acque della zona. Attraverso la disposizione più meno allineata tra i pozzi PTN3-4-38, si identifica un potenziale mescolamento tra questa componente **C** ed una con caratteristiche che derivano, come sopra descritto, da un mescolamento tra le componenti **A** e **B**. E' tuttavia da ricordare (Figura 24) che i tre pozzi menzionati sono gli unici della zona test ad approfondirsi oltre la profondità di 55 m da p.c., andando a drenare, sia gli orizzonti al disopra di questa quota (in maniera analoga ai rimanenti pozzi della zona test), sia quelli posti a profondità comprese tra 65 e 75 m, tali orizzonti risultano separati dagli orizzonti permeabili soprastanti da uno spessore significativo (oltre 10 m) di terreni a

bassa permeabilità. Per questi aspetti, la componente **C**, qualsiasi sia la sua origine, è verosimilmente da ritenersi rappresentativa della sola circolazione idrica che si sviluppa, almeno in zona test, negli orizzonti più profondi. Allo stesso tempo l'allineamento su cui si posizionano i punti PTN38-4-3 in Figura 29 C non è da considerare espressione di un processo di mescolamento che avviene nel sistema acquifero tra le acque degli orizzonti più profondi con quelle degli orizzonti più superficiali, dal momento che l'assetto idrostrutturale non è favorevole a questo, ma più che altro perché nessuno dei pozzi che nella zona test intercettano i soli orizzonti più superficiali accenna minimamente a discostarsi dall'allineamento **A-B** in direzione dei punti PTN38-4-3. Ne consegue che tale mescolamento avviene all'interno dei tre pozzi più profondi ed è causato dalla loro multifenestrazione che consente il contestuale richiamo delle acque più profonde e più superficiali all'interno dell'opera di captazione. Per quanto qui discusso, è conseguenza indiretta che le componenti **A** e **B** risiedano e il loro mescolamento avvenga negli orizzonti meno profondi di 50-55 m. Questo aspetto è peraltro congruente col fatto che la componente **A** prende origine dal Fiume Bisenzio, idraulicamente connesso con la parte più superficiale del sistema, nonché coi valori più elevati di  $\delta^{18}O$ ‰ che si riscontrano nei pozzi più rappresentativi della componente **B** (PTN25-42-21, si veda Figura 29 D e Figura 29 C) e che sono indicativi di una maggiore influenza delle acque che si infiltrano localmente alle quote di pianura.

In definitiva nella zona del test ci sono una serie di indicazioni favorevoli per riconoscere tre componenti principali di alimentazione del sistema e loro determinate modalità di interazione:

- una componente **A** che si origina dal Fiume Bisenzio e defluisce preferenzialmente negli orizzonti acquiferi più superficiali subendo una sorta di maturazione chimica (sicuramente in parte naturale, senza però escludere possibili influenze antropiche) prima di raggiungere la zona del campo pozzi in zona Badie;
- una componente **B**, che pare essenzialmente originarsi dal quadrante occidentale rispetto alla zona baricentrica del campo pozzi e defluire, anch'essa, negli orizzonti permeabili più superficiali;
- una componente **C**, la cui origine è di difficile individuazione, che, almeno all'altezza del campo pozzi, risiede negli orizzonti acquiferi più profondi (tra 65 e 75 m da p.c.);
- le componenti **A** e **B** danno origine ad acque intermedie, sempre negli orizzonti più superficiali, a seguito di un loro mescolamento che si verifica essenzialmente nella zona di minimo piezometrico generato dal campo pozzi, dove vanno a convergere sia i filetti liquidi richiamati dalla zona Bisenzio sia quelli di provenienza dal quadrante occidentale rispetto al campo pozzi stesso;
- la componente **C** risulta mescolarsi con le acque degli orizzonti più superficiali soltanto all'interno delle tre opere di captazione (PTN3-4-38) che in zona test drenano il sistema sia nella parte più superficiale sia in quella relativamente più profonda (per la presenza di multifenestrazioni).

Relativamente ai contaminanti oggetto dello studio, per la distribuzione dei punti all'interno dei diagrammi delle Figura 29 E-F, risulta difficile discriminare a priori se vi sono orizzonti e/o settori responsabili della diffusione dei contaminanti stessi o se c'è una compartecipazione; l'unica cosa

che pare poter sostenere è che la maggiore contaminazione da tetracloroetilene si origini a Nord-Est del campo pozzi (vedi PTN33, ma anche PTN16-3-38 maggiormente esposti alla circolazione idrica proveniente da detto settore).

Lo scopo della perturbazione idrodinamica nel corso del test era proprio quella di alterare le modalità di interazione tra le varie componenti in gioco e verificare se ad una possibile evoluzione dei parametri chimici macrodescrittori e isotopici era associata un'evoluzione delle concentrazioni dei contaminanti in modo da comprenderne meglio l'origine.

Da un punto di vista chimico nel corso del test sono state registrate variazioni significative, che in alcuni casi sono risultate marcate a tal punto di avere tendenze al cambiamento di facies chimica oltre che incrementi o decrementi di concentrazioni assolute. Il caso più rilevante riguarda il pozzo profondo Badie 1 (PTN4), il quale tra la fase "pozzi accesi" e quella "pozzi spenti" mostra un deciso decremento della componente cloruro-alcalina spostandosi verso una composizione più nettamente bicarbonato-alcalino terrosa, che contraddistingue la parte rimanente dei pozzi (Figura 30).

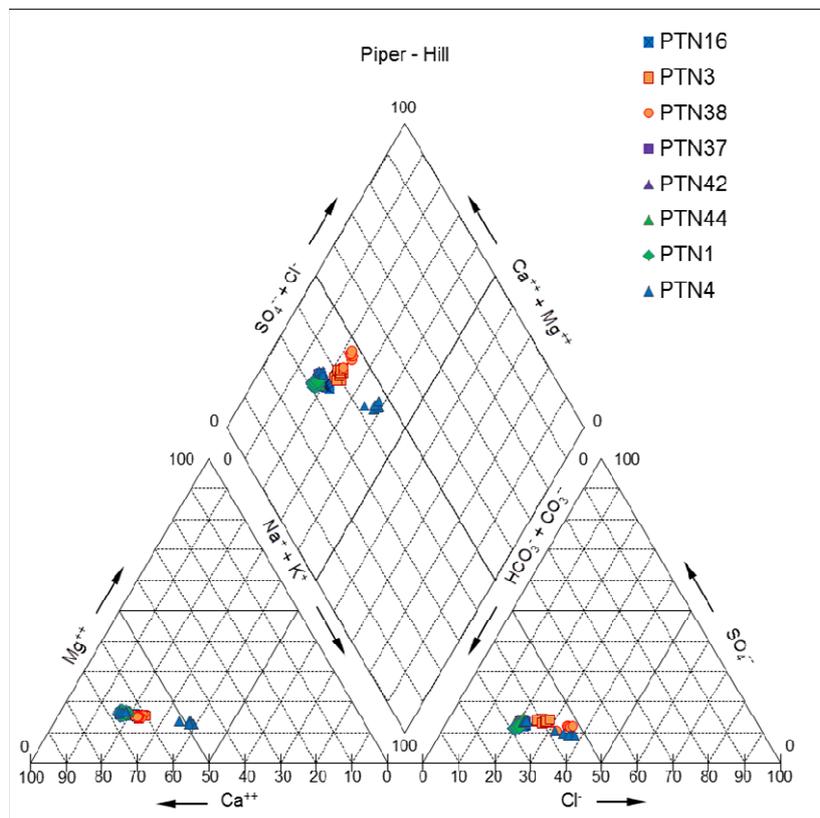


Figura 30 - Diagramma classificativo delle acque analizzate nel corso del test.

Altri pozzi mostrano comunque significative variazioni, meglio apprezzabili attraverso diagrammi quantitativi tipo quello di Figura 31. Nel riquadro ingrandito del diagramma sono inseriti numeri progressivi da 0 a 13, che indicano il progressivo in giorni del periodo test, lo 0 indica il pre-test (che per tutti i pozzi ha mostrato chimismo del tutto simile a quello della campagna estesa di Settembre), il 13 l'ultimo giorno di campionamento, i numeri da 1 a 5 si riferiscono ai giorni di prelievo con campo pozzi inattivo.

Da questa figura risulta ancora più evidente come il Badie 1 (PTN4), nel periodo con campo pozzi inattivo (punti da 1 a 5), mostri una diminuzione decisa del contenuto in cloruri diminuendo la propria salinità, per poi riportarsi alle condizioni pre-test una volta riavviato il campo pozzi. Più in particolare le acque di questo pozzo durante la fase di inattività del campo pozzi presenta caratteristiche molto più simili ad un termine di circolazione più superficiale derivante dal mescolamento tra le componenti **A** e **B** identificate in zona, come sopra descritto (si confrontino le Figura 29 C e Figura 31). In altri termini, nel corso dei 10 minuti in cui è stato messo in emungimento il solo pozzo PTN4 questo risulta aver drenato una percentuale più importante della circolazione idrica più superficiale rispetto a quando l'intero campo pozzi risulta attivo. Di fatto essendo la maggior parte delle captazioni di questo campo pozzi di profondità inferiore ai 50-55 m, quando l'intero campo pozzi è attivo esiste un forte richiamo della circolazione più superficiale, che invece diventa maggiormente disponibile anche per i pozzi più profondi quando il richiamo è eseguito dal singolo pozzo. Poiché per questo pozzo ad un aumento percentuale del drenaggio della circolazione più superficiale corrisponde un incremento significativo di tetracloroetilene (Figura 32), che passa da circa 25 a circa 50 µg/L, si ha indicazione del fatto che questo contaminante al momento pare risiedere essenzialmente nella parte più superficiale del sistema.

Altri due pozzi sono interessati da variazioni degne di nota. Si tratta del Badie 4 (PTN37) e del Badie 3 (PTN16), entrambi interessati da un incremento relativo della salinità durante il periodo di inattività del campo pozzi per poi tornare alle condizioni pre-test quando il campo pozzi viene riattivato. A tale incremento di salinità è associato uno spostamento dei punti in direzione di una componente relativamente arricchita in  $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$ , tipo la componente **B** individuata in zona (si confrontino le Figura 29 C e Figura 31). Se ne deduce che questi due pozzi, durante la loro momentanea attivazione in fase campo pozzi spento, sono in grado di drenare maggiormente (congruentemente a quanto evidenziato in precedenza anche sulla base della piezometria, Figura 28 D e Figura 29 B) la componente di provenienza dal quadrante Ovest. Poiché al trend di variazione chimica dei due pozzi è associata una significativa diminuzione delle concentrazioni di tetracloroetilene (valori che passano da circa 90 µg/L a 50 µg/L per il Badie 4 - PTN37 e da circa 150 µg/L a 60 µg/L per il Badie 3 - PTN16, Figura 32 A), si conclude che la componente proveniente da Ovest è priva o comunque fortemente diluita in questo contaminante rispetto al termine chimicamente evoluto della componente proveniente dal settore Est/Nord-Est.

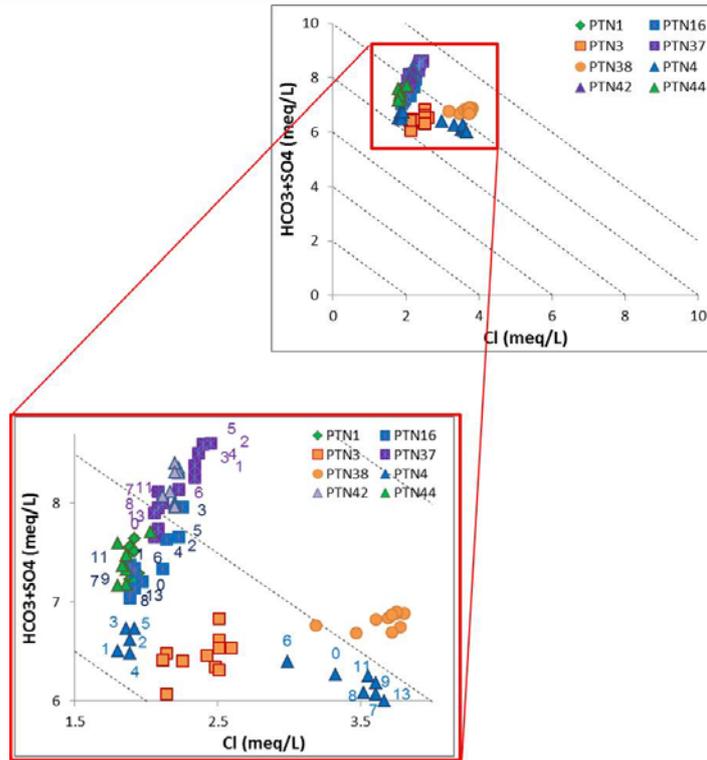


Figura 31 - Diagramma  $HCO_3+SO_4$  vs Cl.

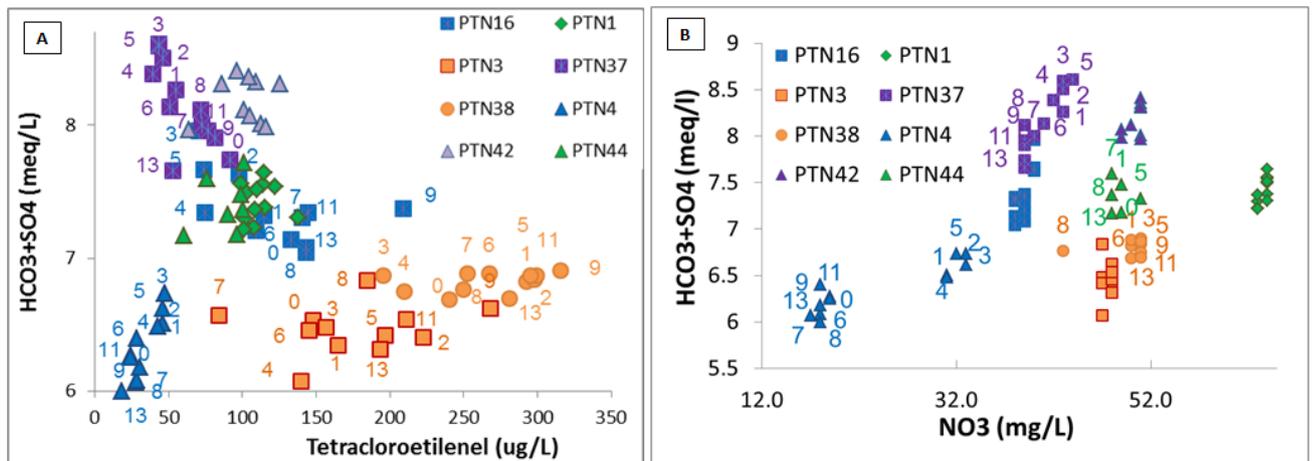


Figura 32 - Diagramma  $HCO_3+SO_4$  vs Tetracloroetilene (A) e  $HCO_3+SO_4$  vs Nitrati (B)

Andando invece ad analizzare le concentrazioni dei nitrati durante il test (Figura 32 B) si può osservare che, per la maggior parte dei pozzi, non si registrano sostanziali variazioni a seguito della perturbazione idrodinamica. Solo il pozzo Badie 1 (PTN4) mostra un aumento nel contenuto in nitrati nel periodo con campo pozzi inattivo con valori che passano da circa 18 mg/L a concentrazioni maggiori intorno ai 30 mg/L. Considerando il fatto che il Badie 1 (PTN4) è l'unico pozzo che sembra drenare prevalentemente le acque che circolano nella falda più profonda e che le acque di questo pozzo durante la fase di inattività del campo pozzi sembrano presentare caratteristiche più simili ad un termine di circolazione superficiale, come precedentemente

discusso, questo aumento in nitrati potrebbe indicarci che le acque che circolano nella falda più profonda possano essere caratterizzate da una minore concentrazione in nitrati.

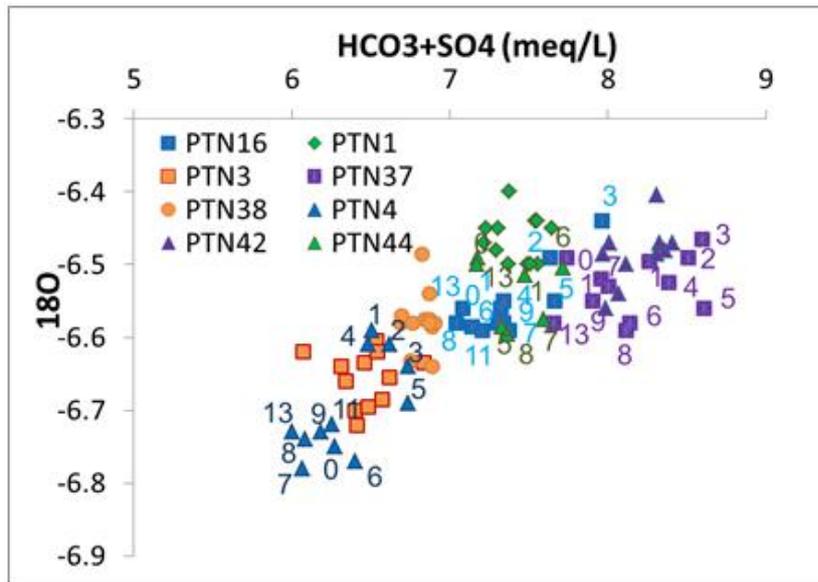


Figura 33 - Diagramma  $HCO_3+SO_4$  vs  $\delta^{18}O\text{‰}$ .

Infine, relativamente alle variazioni dei rapporti isotopici a seguito della perturbazione idrodinamica si può osservare che i pozzi Badie 1, Badie 3 e Badie 4 (PTN4, PTN16 e PTN37) presentano valori isotopici più positivi nei giorni di inattività del campo pozzi per poi tornare alle condizioni pre-test quando il campo pozzi viene riattivato (Figura 33). Questo comportamento conferma quanto precedentemente discusso relativamente al comportamento di questi tre pozzi. Nella fattispecie il Badie 1 (PTN4) durante la fase di inattività del campo pozzi presenta caratteristiche chimico-isotopiche più simile ad un termine di circolazione più superficiale derivante da un mescolamento fra le componenti **A** e **B**, nonché un maggior contributo della componente derivante dal settore occidentale, caratterizzato appunto da valori isotopici più positivi. La stessa variazione verso valori più positivi del  $\delta^{18}O\text{‰}$  per i punti Badie 3 e Badie 4 (PTN16 e PTN37), entrambi drenanti l'acquifero più superficiale, sembrano confermare che nei giorni di inattività del campo pozzi queste captazioni sono in grado di drenare maggiormente la componente di provenienza dal quadrante Ovest (componente **B**, si veda Figura 29 C e D).

### Test 1-12 Febbraio 2016

Nella prima parte del mese di Febbraio 2016 è stato eseguito il secondo test con perturbazione idrodinamica, che ha previsto l'interruzione per sei giorni consecutivi degli emungimenti di una serie di pozzi idropotabili nella *zona Malfante*. La scelta di questa zona è stata essenzialmente condizionata dal fatto che il campo pozzi Malfante dopo alcuni anni in cui è stato mantenuto inattivo per scarsa qualità delle acque (tetracloroetilene che in alcuni pozzi risultava dell'ordine di 1000  $\mu\text{g/L}$ ), è stato riattivato "in scarico" nel mese di Dicembre 2015 verificando un deciso incremento delle concentrazioni del contaminante (in alcuni casi le concentrazioni di tetracloroetilene hanno superato i 5000  $\mu\text{g/L}$ ). Dopo la ripetizione delle analisi in giorni successivi

nel periodo Dicembre 2015 - Gennaio 2016, e la conferma di valori di tetracloroetilene particolarmente elevati, è stato quindi deciso di procedere con il test in questa zona con l'intento di ottenere maggiori informazioni a riguardo di questa situazione di contaminazione. Il giorno 26 Gennaio 2016 è stata eseguita una campagna preliminare, nel corso della quale oltre ai pozzi Publiacqua sono stati considerati alcuni pozzi privati della zona per verificare la loro rappresentatività nell'ottica di includerli nella rete di monitoraggio in fase test. Il giorno 1 Febbraio 2016, precedentemente all'interruzione dei pozzi, è stata eseguita una campagna finalizzata a definire le condizioni del livello idrico e le caratteristiche chimico-isotopiche delle acque della zona subito prima dell'interruzione dei pozzi Publiacqua, avvenuta il giorno seguente, ovvero il 2 Febbraio 2016. Nel corso dei sei giorni di inattività di detti pozzi (2-7 Febbraio) si è provveduto a misurare livelli ed a campionare (attivando un pozzo alla volta per 10 minuti) quotidianamente. Queste attività sono inoltre proseguite anche dopo la riaccensione definitiva del campo pozzi, sull'arco temporale 8-12 Febbraio.

In Figura 34 è riportata l'ubicazione dei punti presi in esame nel corso di queste indagini, nonché il quadro temporale riassuntivo delle attività svolte e dello stato di attività dei pozzi.

Lo spegnimento e riaccensione dei pozzi sono avvenuti per i pozzi PTN9, PTN45, PTN47 e PTN48, mentre il pozzo PTN46 è stato mantenuto spento per tutto il corso del test in quanto pozzo sprovvisto di pompa. In quest'ultimo (PTN46-Malfante 1) è stato installato un sistema di monitoraggio dei livelli piezometrici in continuo da parte di Publiacqua, mentre nel pozzo PTN45 (Malfante2) è stato installato dagli scriventi uno strumento per la misura in continuo sia del livello piezometrico sia della conducibilità elettrica.

Inoltre, sia il giorno antecedente all'interruzione dei pozzi (1 Febbraio 2016), sia il giorno della riaccensione dei pozzi (8 Febbraio 2016) le misure del livello idrico hanno interessato anche una serie di pozzi al contorno della specifica zona test (Figura 34).

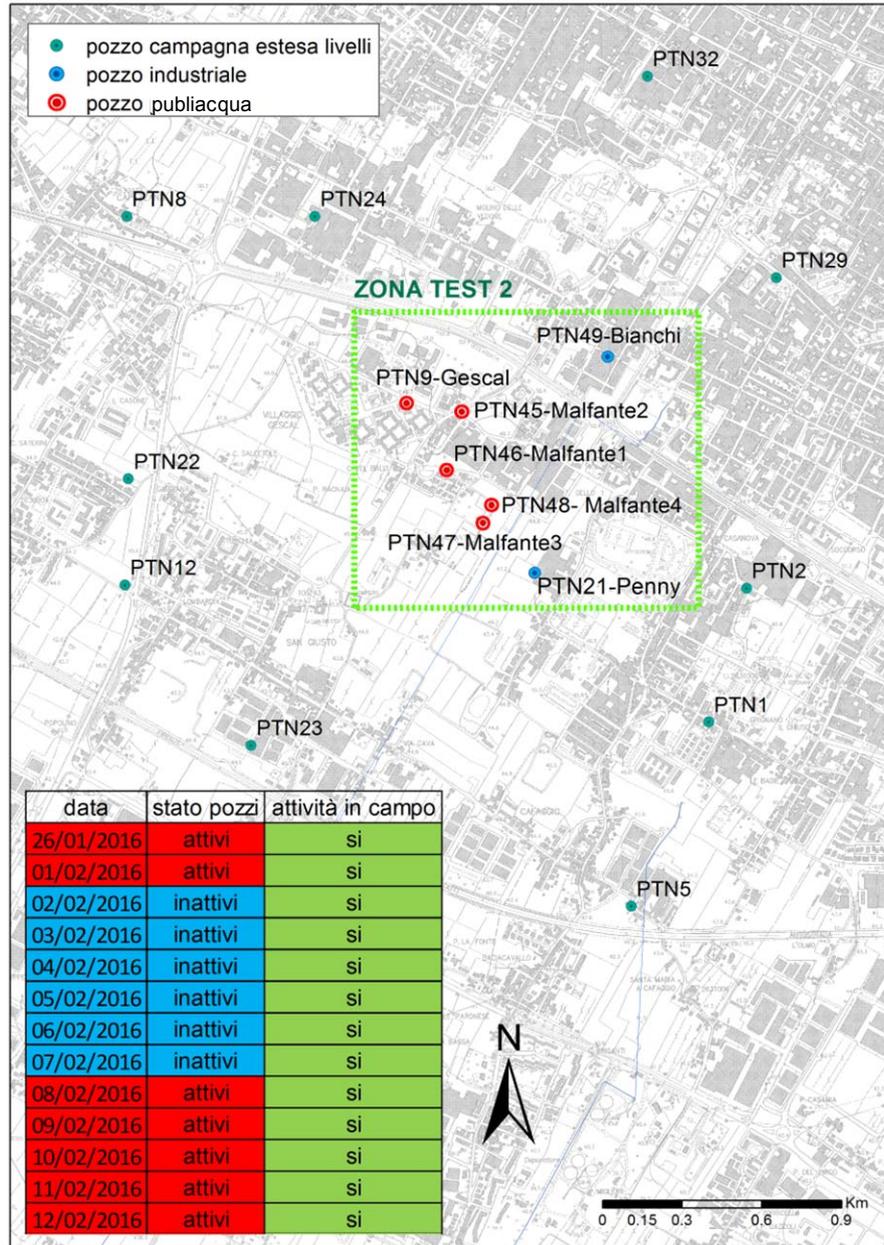


Figura 34 - Punti presi in esame e cronoprogramma delle attività nel corso del test

Oltre a quelle dei pozzi, sono state campionate ed analizzate anche le acque piovane raccolte tramite pluviometro appositamente installato presso il pozzo Cafaggio Lavatoi (PTN5). Questo perché durante il periodo del test si sono verificate precipitazioni significative, ed era opportuno verificarne il segnale isotopico, qualora questo avesse influenzato nel breve periodo i contenuti isotopici delle acque di falda. Di fatto le piogge raccolte sono risultate decisamente più positive ( $\delta^{18}O\text{‰} -5.24$ ) rispetto al valore di base (1 Febbraio, pre-test) delle acque sotterranee ( $\delta^{18}O\text{‰}$  tra -6.5 e -6.7), e non si è registrato in quest'ultime un'evoluzione verso valori più positivi. Si può di conseguenza concludere che nel breve periodo della prova dette precipitazioni non hanno raggiunto le acque sotterranee della zona test.

In Figura 35 si riportano le stratigrafie semplificate e le quote dei filtri dei pozzi Publicacqua presi in esame nel corso di questo test.

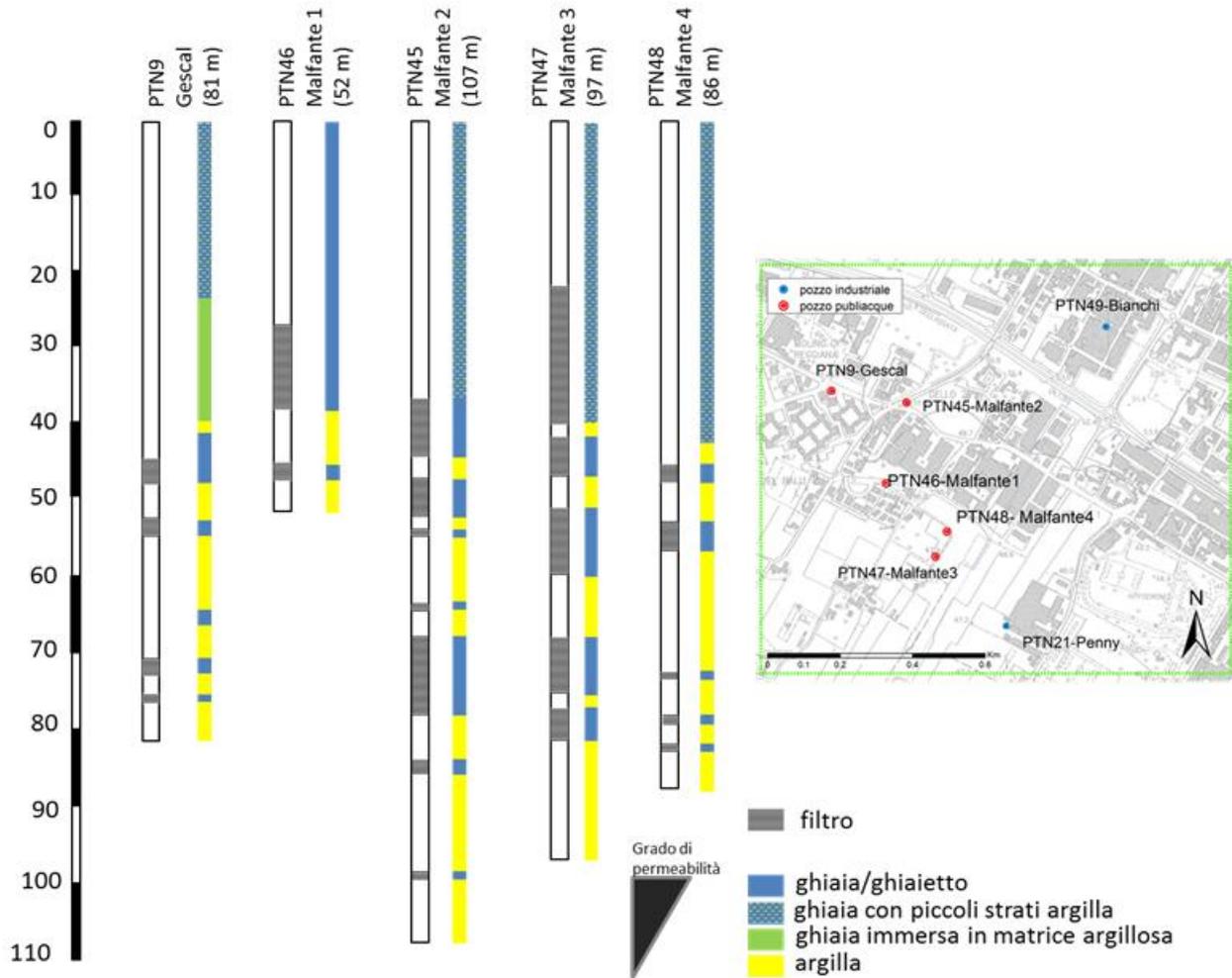


Figura 35 – Stratigrafie e quote filtri dei pozzi Publiacqua in zona test.

Dalla figura si evince come nella zona del test solo il pozzo Malfante 1 (PTN46) si attesti intorno ad una profondità di circa 50 m, mentre gli altri pozzi variano la loro profondità tra gli 80 e 110 m. Tutti i pozzi risultano multifenestrati, ovvero drenano più orizzonti acquiferi simultaneamente.

Basandosi sulle stratigrafie a disposizione, nella zona si individua un orizzonte freatico che dal piano campagna si sviluppa fino alle profondità di 40-45 m, al disotto del quale si sviluppa un sistema multistrato con alternanza di orizzonti permeabili e orizzonti di scarsa-nulla permeabilità, in entrambi i casi con spessori variabili dalla scala metrica a decametrica. Nel settore più occidentale la stratigrafia del Pozzo Gescal (PTN9) sembra indicare più scarse proprietà idrauliche dell'orizzonte superficiale, con conseguente tendenza ad un maggior confinamento degli orizzonti permeabili più profondi (a partire da 45 m di profondità). Tra i pozzi attivi, la distribuzione dei filtri suggerisce che i Malfante 2 e 3 (PTN45 e PTN47) oltre agli orizzonti più profondi drenano in maniera significativa anche l'orizzonte freatico; il Malfante 4 (PTN48) ed il Gescal (PTN9), con maggior riferimento a quest'ultimo, sembrano viceversa esser maggiormente rappresentativi delle acque circolanti negli orizzonti confinati o semiconfinati presenti a profondità superiori ai 45-50 metri. Il pozzo Malfante 1 (PTN46), inattivo, risulta intercettare prevalentemente l'acquifero più superficiale freatico ed in minima parte un primo orizzonte confinato/semiconfinato.

Da un punto di vista piezometrico i pozzi idropotabili Gescal, Malfante 2, Malfante 3 e Malfante 4 (rispettivamente PTN9, PTN45, PTN47 e PTN48) hanno mostrato una omogenea risposta alla perturbazione idrodinamica indotta dallo spegnimento del campo pozzi idropotabile (Figura 36 A). L'unico pozzo Publiacqua che sembra risentire in misura minore dello spegnimento del campo pozzi è il Malfante 1 (PTN46) che presenta un graduale, seppur minimo innalzamento della falda ed un successivo abbassamento; nella fattispecie, dai dati di monitoraggio in continuo del Malfante 1 (PTN46) (Figura 36 B), a seguito dello spegnimento dei pozzi, si osserva un graduale innalzamento del livello piezometrico dell'ordine di 0.15 m, seguito da un graduale abbassamento della falda dopo la riaccensione dei pozzi (con un tempo di ritardo di circa 6 ore), che a fine prova (dopo 5 giorni di emungimento) si attestava intorno a 0.25 m.

Inoltre dall'analisi del cronoprogramma di Figura 36 B, in particolar modo dall'andamento in continuo del livello piezometrico nel pozzo Malfante 2 (PTN45), si evince che l'area in esame risulta esser fortemente influenzata dall'emungimento di alcuni pozzi, probabilmente industriali, che provocano un abbassamento importante (dell'ordine di circa 0.5 m) durante i giorni ed in orari lavorativi. Si osserva quotidianamente un abbassamento del livello piezometrico a partire da circa le ore 7 del mattino, seguito da un innalzamento del livello a partire dalle ore 17-18 per tutta le ore notturne fino alla mattina successiva. Questo fenomeno non risulta evidente nel fine settimana, dove si registra invece un continuo innalzamento del livello, confermando l'ipotesi che queste variazioni della falda siano dovute alle attività industriali presenti nell'area.

Il pozzo Malfante 1 (PTN46) non mostra queste oscillazioni giornaliere nonostante la vicinanza col Malfante 2 (PTN45). Considerando le stratigrafie e gli schemi di condizionamento dei pozzi, questo potrebbe essere dovuto al fatto che le variazioni di livello della falda hanno prevalentemente interessato gli orizzonti profondi non intercettati dal Malfante 1 (PTN46), oppure più verosimilmente, la spiegazione di questo anomalo comportamento rispetto ai pozzi vicini è da ricercare in un'inefficienza idraulica dell'opera maturata nel tempo.

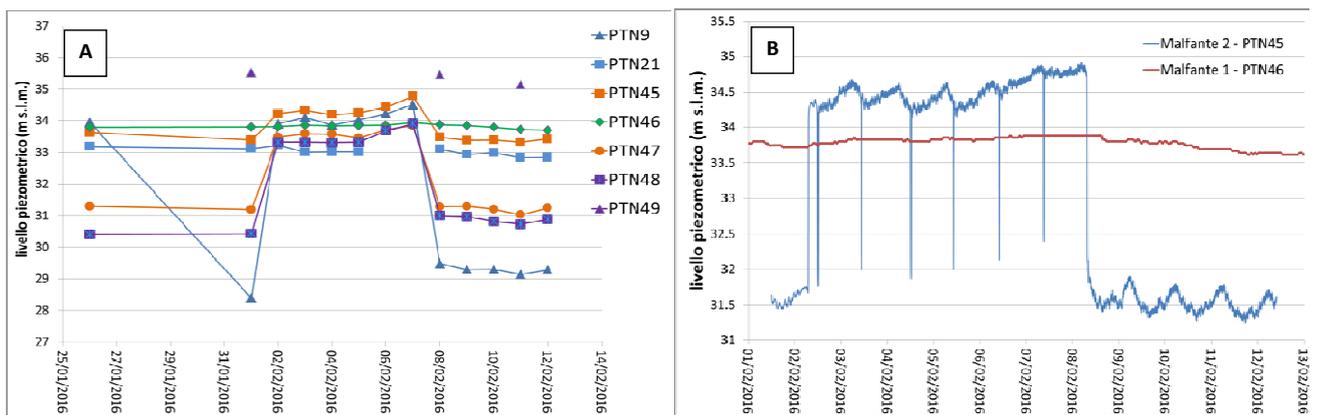


Figura 36 – Evoluzione dei livelli idrici nei pozzi nel corso del test. A Misure giornaliere. B Misure di monitoraggio i continuo

Relativamente ai due pozzi privati considerati durante il test (Pozzi PTN21 e PTN49) si può osservare come il Pozzo PTN21 (misurato sempre in condizioni statiche) presenti un minimo incremento di livello il giorno dello spegnimento dei pozzi (2 febbraio), per poi riscendere e mantenersi circa costante nei giorni successivi. A seguito della riaccensione, invece, sembra

mostrare un graduale abbassamento della falda anche se di minima entità; per quanto riguarda il pozzo PTN49 i livelli piezometrici a disposizione sono talmente pochi che non è possibile fare delle considerazioni a riguardo, se non sottolineare che i valori misurati in questo pozzo risultano i maggiori in termini assoluti di tutta l'area test, in accordo con l'ubicazione a monte idrogeologico del pozzo stesso.

Analogamente a quanto fatto per il test in zona Badie, sono state realizzate le superfici piezometriche della zona in condizioni dinamiche (Figura 37 A - 1 Febbraio, pre-test campo pozzi attivo) e in condizioni statiche (Figura 37 B - 7 Febbraio, campo pozzi spento ed emungimenti industriali presumibilmente assenti, trattandosi di una domenica), nonché due elaborazioni (Figura 37 C e D) in cui si considerano i livelli dinamici rispettivamente dei pozzi Malfante 2 (PTN45) e Malfante 4 (PTN48) registrati a seguito dei 10 minuti di emungimento in occasione del campionamento del 7 Febbraio. Per non trascurare del tutto gli effetti della zona al contorno dell'area test, nelle elaborazioni sono stati inclusi alcuni pozzi circostanti misurati il 1 Febbraio.

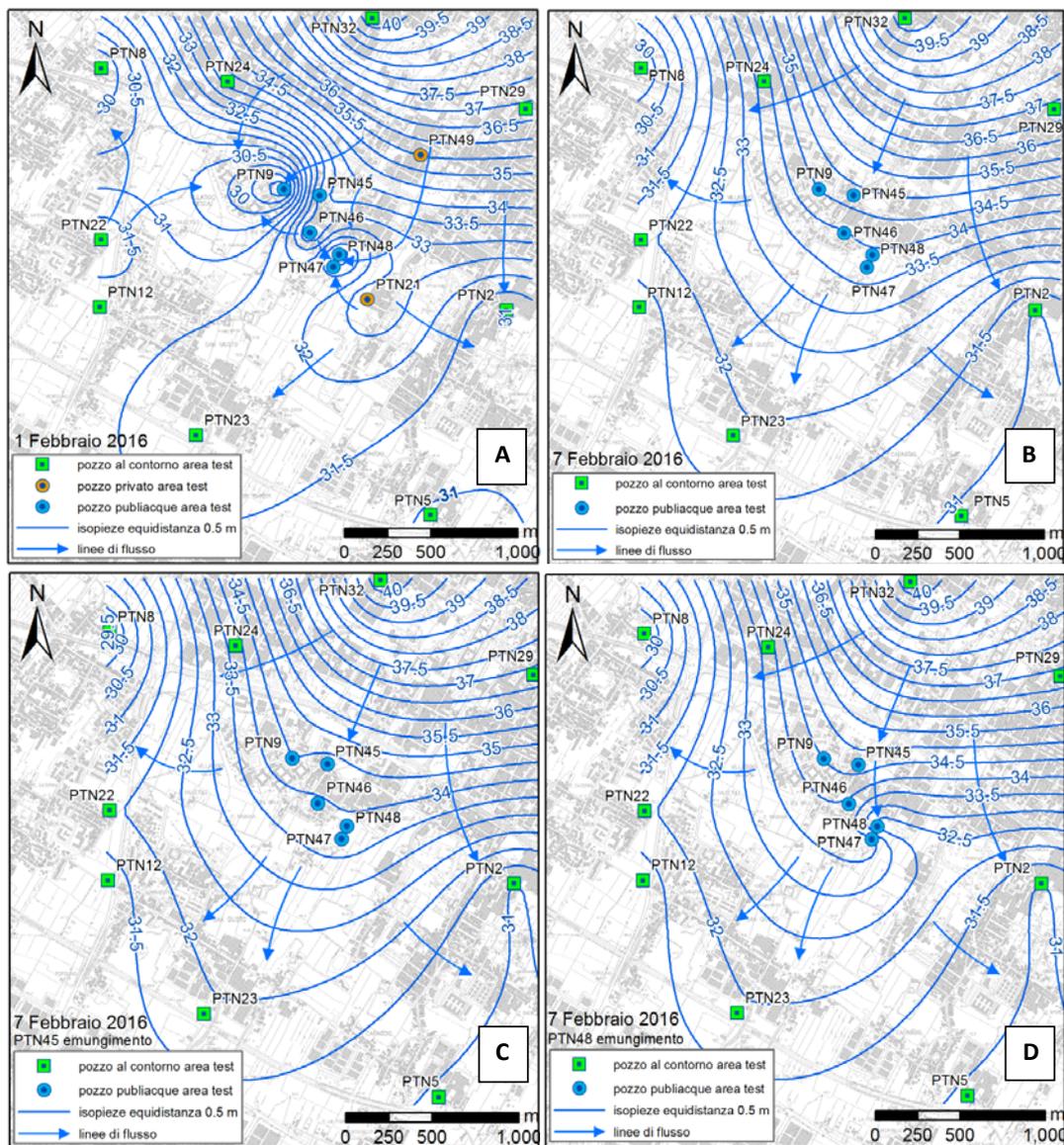


Figura 37 – Piezometrie della zona test in condizioni dinamiche (A), statiche (B), statiche con il solo pozzo PTN45 in emungimento (C) e statiche con il solo pozzo PTN48 in emungimento (D)

Pur considerando che durante le campagne di Giugno e Settembre 2015 i pozzi Malfante (PTN45, PTN46, PTN47 e PTN48) erano tutti inattivi, se confrontiamo la morfologia della superficie piezometrica nella zona test rispetto alle campagne estese non si riscontrano particolari differenze, se non, ovviamente, per la presenza dei minimi piezometri dovuti all'emungimento dei pozzi stessi relativamente alla piezometria in condizioni dinamiche (Figura 37). L'area dove è stato condotto il secondo test è situata sull'alto piezometrico che corrisponde allo spartiacque di direzione N-S discusso precedentemente in occasione delle piezometrie delle campagne estese. L'area è quindi caratterizzata da un importante flusso idrico con direzione NNE-SSW da ricondurre all'alimentazione da parte del Fiume Bisenzio, dalla zona del suo ingresso nella piana, e da una possibile componente di travaso dagli acquiferi in roccia dei settori collinari/montani.

Andando ad osservare le differenze dei carichi idraulici tra il pre-test ed il giorno finale del periodo di inattività del campo pozzi (Figura 37 A e B), all'altezza di quest'ultimo si verifica una generale risalita della piezometrica dell'ordine dei 1.5-2 metri ed una decrescita dei gradienti idraulici, venendo meno le depressioni piezometriche determinate dagli emungimenti. L'operazione di spegnimento del campo pozzi ha di conseguenza avuto un effetto idrodinamico decisamente inferiore rispetto a quanto è stato invece determinato con il primo test in zona Badie (innalzamento piezometrico generale dell'ordine dei 3-4 metri). Questo è da rilegare in parte alla minore portata complessiva del campo pozzi Malfante (60-70 l/s) rispetto a quella del campo pozzi Badie (90-95 l/s), ma in parte anche a condizioni idraulico-idrodinamico diverse tra le due zone. Di fatto la zona Malfante, come ricordato precedentemente, appartiene all'alto piezometrico relativo che dall'ingresso in pianura del Bisenzio si sviluppa verso la parte meridionale lungo una direzione N-NE/S-SW (Figura 15 e Figura 16); questo alto piezometrico è peraltro sempre stato registrato anche nelle ricostruzioni piezometriche del passato (Figura 3). Questi elementi portano ad ipotizzare la presenza di un paleo alveo del Bisenzio con permeabilità e trasmissività relativamente maggiori rispetto alle zone circostanti, ovvero condizioni idrauliche in acquifero che determinano una minore risposta della falda in termini di abbassamenti e innalzamenti dei livelli a parità di portate di emungimento in gioco.

In un certo senso questo sembra confermato anche dalle due Figura 37 C e D dove si può osservare l'effetto dell'emungimento del singolo pozzo (rispettivamente PTN45 e PTN48) in occasione dei campionamenti in fase "campo pozzi inattivo". Di fatto non sembrano registrarsi importanti effetti ed il richiamo di acqua da parte del pozzo stesso in occasione dell'emungimento specifico non sembra interessare settori particolarmente diversi rispetto a quando si è in condizione di campo pozzi attivo.

Ai minori effetti idrodinamici indotti dalle manovre sul campo pozzi in fase test sembrano corrispondere anche minor effetti di variazioni chimiche ed isotopiche delle acque nei singoli pozzi. Infatti, mentre in zona Badie si erano osservate variazioni importanti che in taluni casi portavano a cambiamenti di facies chimica per le acque dei pozzi, in questa zona nel corso del test nessun pozzo ha mostrato decise variazioni sui parametri chimici e isotopici (Figura 37). L'unico pozzo che ha mostrato variazioni leggermente più evidenti è il Malfante 3 (PTN47), i cui punti nei vari diagrammi di Figura 37 vengono contraddistinti con una numerazione da 0-12 indicativa dei giorni progressivi

del periodo test (0 e 1 giorni di pre-test con campo pozzi attivo; da 2 a 7 giorni con campo pozzi inattivo; da 8 a 12 giorni in cui il campo pozzi è stato riattivato e mantenuto attivo).

Sebbene si siano avute minime variazioni chimiche ed isotopiche a livello dei singoli pozzi, l'insieme dei dati ottenuti con il test mette in evidenza degli aspetti importanti. Come si può osservare dai diagrammi Figura 38 l'insieme dei pozzi mostra che nella ristretta zona in esame sono presenti acque che coprono un intervallo di valori di  $\delta^{18}\text{O}$  relativamente ampio,  $-6.4 \div -6.8\text{‰}$ . Considerando le stratigrafie e gli schemi di condizionamento dei pozzi (Figura 35), si arriva a concludere che questo intervallo relativamente ampio (se considerata la limitata estensione della zona) è da attribuirsi alla presenza di diverse componenti che si sviluppano su orizzonti permeabili posti a quote diverse. Di fatto il pozzo Malfante 3 (PTN47) è quello che può maggiormente drenare le acque dell'acquifero freatico (Figura 35) ed è quello che mostra i più elevati valori di  $\delta^{18}\text{O}$  ( $-6.4\text{‰}$ ) a testimonianza di una maggiore partecipazione delle acque di infiltrazione locale nel totale drenato da questo pozzo. Per contro, il pozzo Gescal (PTN9) mostra i più bassi valori di  $\delta^{18}\text{O}$  ( $-6.8\text{‰}$ ) che portano maggiormente memoria di una componente che si origina a quote più elevate (componente travasata dal Fiume Bisenzio e dai rilievi collinari-montani), e allo stesso tempo, come anticipato anche in precedenza, questa opera di captazione risulta nella zona la più rappresentativa della circolazione idrica che si sviluppa negli orizzonti confinati/semi-confinati a profondità maggiori di 45-50 metri (Figura 35). Questa differenziazione verticale di varie componenti di circolazione e la loro scarsa interazione (se non all'interno delle opere di captazione, essendo queste multifenestrate) viene confermata anche dai parametri chimici che vengono confrontati col  $\delta^{18}\text{O}$  nei vari diagrammi di Figura 38. Infatti si osservano relazioni lineari tra contenuti isotopici e concentrazioni chimiche, ed in particolare a valori più elevati di  $\delta^{18}\text{O}$  corrispondono concentrazioni più alte dei composti chimici macro-descrittori ( $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$  e Cl), ma in generale anche dei contaminanti  $\text{NO}_3$  e tetracloroetilene. Si sottolinea che con questo ragionamento generale risulta congruente anche quanto osservato per i due pozzi privati PTN21 e PTN49, per i quali non si conoscono stratigrafie e schemi di condizionamento ma le rispettive profondità di 80 metri e 50 metri sono in linea con i minori e maggiori valori chimici ed isotopici osservati rispettivamente per PTN21 e PTN49.

Se ne conclude che, in maniera analoga a quanto osservato in zona Badie, anche in questa zona la propagazione della contaminazione sembra esser essenzialmente rilegata all'orizzonte acquifero più superficiale. Questo risulta maggiormente evidente per il tetracloroetilene.

Un ultimo aspetto da evidenziare è che con particolare riferimento al tetracloroetilene, la forte contaminazione osservata a livello dell'orizzonte freatico nella zona test sembra esser circoscritta proprio alla zona Malfante e poco più a Nord. Infatti andando a considerare i dati delle due campagne estese relativi ai pozzi al contorno della zona test (Figura 38 e Figura 39), si osservano concentrazioni generalmente basse anche in pozzi che mostrano un  $\delta^{18}\text{O}$  relativamente elevato indicativo di una circolazione più superficiale, in accordo peraltro con la limitata profondità dei pozzi stessi.

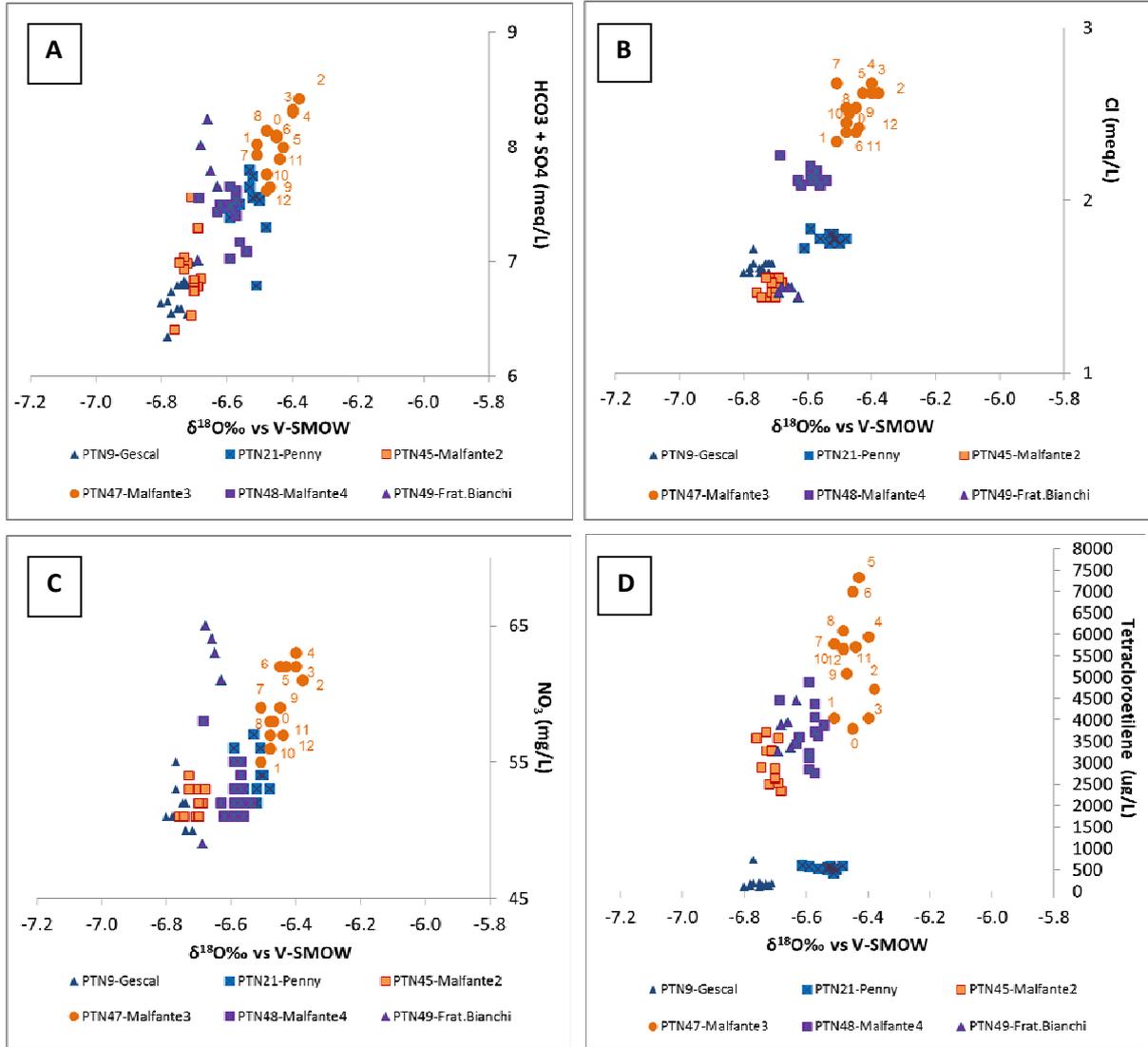


Figura 38 – Diagrammi comparativi  $HCO_3+SO_4$  vs  $\delta^{18}O_{\text{‰}}$  (A)  $Cl$  vs  $\delta^{18}O_{\text{‰}}$  (B),  $NO_3$  vs  $\delta^{18}O_{\text{‰}}$  (C), Tetracloroetilene vs  $\delta^{18}O_{\text{‰}}$  (D) relativi ai campioni prelevati nel corso test in zona Malfante

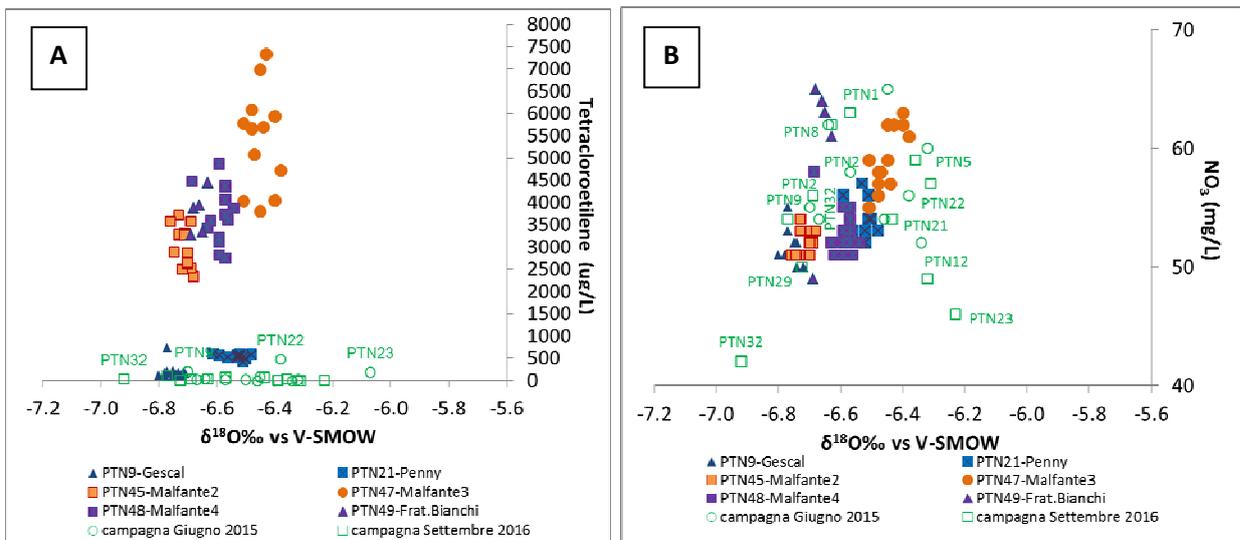


Figura 39 – Diagrammi comparativi Tetracloroetilene vs  $\delta^{18}O_{\text{‰}}$  (A) e  $NO_3$  vs  $\delta^{18}O_{\text{‰}}$  (B) relativi ai pozzi zona Malfante ed ai pozzi che insistono nelle zone al contorno.

### 6 CONCLUSIONI

La caratterizzazione dei fenomeni di inquinamento da nitrati e tetracloroetilene, obiettivo complessivo del presente lavoro, presenta una serie di elementi di difficoltà legati alla complessità idrogeologica dell'acquifero pratese, alla numerosità e vetustà delle opere di captazione (pozzi), alla diffusione dell'inquinamento, alla non chiarita origine dell'inquinamento, alla stessa natura degli inquinanti considerati.

Lo studio si è svolto attraverso due fasi principali. Una prima fase in cui sono stati raccolti, elaborati ed interpretati i dati pregressi di natura fisica e chimica riguardanti il sistema acquifero della piana di Prato ed una seconda fase, con la quale sono state svolte indagini idrogeologiche ed idrogeochimiche che hanno prodotto nuovi dati, permettendo di giungere ad alcune conclusioni che forniscono nuovi elementi di indirizzo. In particolare, queste indagini sono state condotte nel corso di due campagne (condizioni di morbida e di magra) estese a tutta la parte principale del conoide di Prato, nonché per mezzo di due test che hanno previsto l'interruzione temporanea degli emungimenti in due aree significative al fine di perturbare l'idrodinamica locale del sistema. In entrambe le tipologie di indagine sono stati determinati i livelli piezometrici, nonché raccolti campioni d'acqua su cui sono state eseguite analisi chimiche e isotopiche.

L'analisi dei dati storici ha evidenziato come, a fronte di una decisa riduzione degli emungimenti industriali, la falda pratese sia stata interessata da una risalita generale dei livelli piezometrici, che dal 2000 al 2010 hanno recuperato circa 15-20 metri. Tale aspetto e l'"abbandono" di alcuni pozzi idropotabili (legato ad una scarsa qualità delle acque) della zona più a ridosso della città, nonché la compensazione di questi con maggiori emungimenti a scopo idropotabile nella parte a Sud, sono stati probabilmente responsabili anche dell'osservata migrazione dei minimi piezometrici verso la parte più meridionale della piana.

Per quanto riguarda i dati di monitoraggio qualitativo, i database Publiacqua e ARPAT, nell'insieme riferiti a 45 pozzi situati a sud di Prato, permettono di evidenziare specifici trend delle concentrazioni dei contaminanti sul periodo 2000-2015. In particolare nei settori posti più a nord dell'area monitorata ("Vergaio" e "Badie Nord") si riscontrano più elevate concentrazioni sia in nitrati, che in tetracloroetilene, rispetto ai settori più meridionali ("Iolo" e "Badie Sud"), ma allo stesso tempo tali tenori mostrano una tendenza alla diminuzione nel tempo, con maggiori evidenze per il tetracloroetilene. Per contro, nei settori più meridionali, benché le concentrazioni assolute si mantengano ben al di sotto di quelle delle parti più a nord, si registra un certo incremento sia in nitrati, sia in tetracloroetilene, in particolar modo a partire dal periodo 2008-2010. In generale, l'evoluzione regolare delle concentrazioni e la posizione geografica dei pozzi su cui si è osservata sembrano suggerire che quanto oggi registrato non sia dovuto a nuovi fenomeni significativi di contaminazione, ma più all'effetto dell'idrodinamica del sistema su fenomeni di contaminazione avvenuti in passato. E' dunque evidente un trasferimento della contaminazione dai settori più settentrionali verso quelli meridionali, in un quadro di diminuzione della contaminazione dell'area a nord, tradizionalmente più contaminata.

Le superfici piezometriche ricostruite in occasione delle campagne estese svolte in condizione di morbida e magra, rispettivamente a Giugno e Settembre 2015, confermano il ruolo significativo del Fiume Bisenzio e degli acquiferi collinari/montani nell'alimentazione del sistema della piana. Da un confronto con le piezometrie del passato si può evidenziare che il processo di risalita dei livelli, avuto dal 2000 al 2010, si è esaurito, con la relativa migrazione verso Sud dei minimi piezometrici. Si rilevano inoltre due principali spartiacque idrogeologici dinamici, suscettibili cioè di variazione, poiché in parte determinati dalle specifiche condizioni di sfruttamento e dal rapporto tra queste e l'alimentazione. Il primo spartiacque si sviluppa pressappoco in direzione N-S, nella parte assiale del conoide, il secondo, più evidente nella campagna di Giugno, percorre una direzione W-E nel settore occidentale della piana. Questa configurazione piezometrica favorisce la ripartizione della circolazione idrica sotterranea in settori tra di loro poco comunicanti e/o comunicanti soltanto in alcuni periodi dell'anno. In particolare, si ha la tendenza ad una separazione tra la circolazione che insiste nel settore orientale rispetto a quella del settore occidentale ed in quest'ultimo una tendenza alla separazione tra la parte Nord e la parte Sud.

Congruentemente all'assetto piezometrico, i dati chimici ed isotopici delle due campagne estese mettono in luce che le alimentazioni da parte del Fiume Bisenzio e dalle zone collinari/montane settentrionali sono maggiormente riconoscibili nel settore orientale della piana ed in quello nord della parte occidentale. Nella zona sud-occidentale il segnale idrogeochimico evidenzia viceversa una maggior peso relativo dell'infiltrazione locale (quella cioè che si verifica direttamente nei depositi della piana) e di una possibile alimentazione dalle colline meridionali. L'esistenza e l'importanza della componente di infiltrazione diretta di acque meteoriche a livello dell'intera piana è confermata indirettamente dai dati della campagna di Settembre 2015. Infatti, in questo periodo si assiste ad un sensibile decremento generale dei valori isotopici anche nei settori più a Sud, nonché ad una presenza di valori isotopici maggiormente di competenza del settore più settentrionale, come ben riscontrato nella prima campagna (Giugno 2015). Di fatto le precipitazioni che si sono verificate tra Giugno e Settembre, oltre ad essere risultate inferiori rispetto a quelle del periodo che ha preceduto la campagna di Giugno, solo in misura secondaria possono aver raggiunto la falda, dal momento che le temperature del periodo favoriscono un forte tasso di evapotraspirazione (oltre che una maggiore necessità di integrazione della capacità idrica di campo nei suoli). Di conseguenza l'apporto di valori isotopici relativamente più elevati rilegabili alle precipitazioni locali (che si verificano alle quote della piana) risulta meno importante e la componente che si origina da quote più elevate, che ha un'inerzia maggiore e che è trasferita alla piana dal Bisenzio e dagli acquiferi collinari-montani, aumenta percentualmente nel sistema determinando un relativo decremento isotopico nelle acque campionate.

Questi aspetti, congiuntamente ad un decremento significativo delle concentrazioni di tetracloroetilene osservato tra la campagna di Giugno e quella di Settembre, forniscono indicazioni importanti sulla presenza e diffusione di questo contaminante, che sembrano interessare principalmente l'orizzonte permeabile più superficiale in cui si ha una circolazione a prevalente

carattere freatico. Quanto osservato suggerisce che le fonti di inquinamento di tetracloroetilene, almeno in quota parte, possano risiedere nella zona insatura dell'acquifero ed esser dilavate dal passaggio delle acque di neoinfiltrazione nei periodi più piovosi dell'anno. L'assenza di significative variazioni stagionali delle concentrazioni in nitrati, o al limite la presenza di minimi incrementi tra Giugno e Settembre, indica che questo contaminante risente poco delle acque di neoinfiltrazione, suggerendo una minima dipendenza delle sue concentrazioni dalle attività di superficie attuali ed una più o meno omogenea sua diffusione nella parte satura, con possibilità di un significativo coinvolgimento anche degli orizzonti permeabili più profondi. La maggiore persistenza ed azione del tetracloroetilene sull'orizzonte freatico sembra in linea generale esser confermata dalla maggiore ricorrenza di concentrazioni più elevate per acque caratterizzate da valori isotopici più elevati, i quali indicano, appunto, un maggior coinvolgimento delle acque d'infiltrazione locale. Queste considerazioni non possono essere desunte semplicemente considerando la profondità dei pozzi, con la quale non si osservano particolari relazioni a causa della generale multi-fenestrazione delle perforazioni, che interessa, in ogni pozzo, sostanzialmente tutti gli orizzonti produttivi incontrati.

Un ultimo aspetto da sottolineare sulla base dei dati delle due campagne estese, è la distribuzione areale della contaminazione. Per quanto riguarda i nitrati la loro presenza in concentrazioni relativamente elevate (in gran parte tra 40 e 60 mg/l) è riscontrata in maniera più o meno omogenea sull'intera area studiata; viceversa la presenza di elevate concentrazioni di tetracloroetilene (> 50 µg/l) riguarda zone più circoscritte.

Con i due test eseguiti rispettivamente a Ottobre 2015 e Febbraio 2016 nelle due zone dei campi pozzi di Badie e Malfante, si è tentato di perturbare (disattivando per alcuni giorni i campi pozzi stessi e successivamente riattivandoli) l'idrodinamica locale per favorire una variazione delle percentuali relative delle diverse componenti di circolazione che sono o possono essere richiamate simultaneamente all'interno dei singoli pozzi, considerata anche la loro multi-fenestrazione.

L'insieme dei dati piezometrici, chimici ed isotopici prodotti e l'analisi della loro evoluzione nel corso di questi test hanno permesso di ottenere informazioni importanti sulla provenienza e diffusione dei contaminanti in relazione alle due zone investigate. In particolare, in entrambe le zone è stato verificato che il tetracloroetilene è diffuso essenzialmente nella parte più superficiale del sistema, all'interno della circolazione perlopiù freatica che si sviluppa a profondità inferiori ai 45-50 m. Le acque circolanti negli orizzonti permeabili semi-confinati/confinati, anche queste intercettate da buona parte dei pozzi presi in esame, non sembrano al momento interessate da una significativa presenza di questo contaminante. Allo stesso tempo è stato possibile evidenziare che la provenienza del contaminante è da ricercare nel caso delle Badie nei settori posti a Nord-Est del campo pozzi, mentre nel caso dell'area Malfante l'origine sembra riconducibile alla specifica zona che contiene il campo pozzi e che si estende poco a Nord dello stesso. In questa zona le concentrazioni di tetracloroetilene sono risultate peraltro molto elevate, dell'ordine di alcuni mg/l.

Anche per quanto riguarda i nitrati, i dati dei test indicano una maggiore presenza di questo contaminante nell'orizzonte permeabile più superficiale rispetto agli orizzonti più profondi; ciò è comunque molto meno evidente rispetto a quanto osservato per il tetracloroetilene, in linea con le indicazioni generali ottenute con le due campagne estese.

I risultati ottenuti con questo studio, oltre ad arricchire il quadro conoscitivo generale del sistema idrogeologico della piana di Prato, forniscono in definitiva elementi utili sia per la gestione della risorsa idropotabile, che per il controllo più generale del fenomeno di inquinamento dell'acquifero pratese.

Di fatto, un elemento fondamentale di cui tener conto in termini di captazione/gestione della risorsa idrica è la necessità di eseguire opere di captazione con singola fenestrazione o che comunque non drenino l'orizzonte acquifero più superficiale laddove questo presenti concentrazioni non accettabili nell'ottica del trattamento a scopo idropotabile. E' probabile che ciò porti ad una minore produttività della singola opera, ma a questo si potrebbe far fronte provvedendo alla realizzazione di più pozzi o di pozzi a raggiera.

Allo stesso tempo, le azioni di contenimento andrebbero concentrate sul primo orizzonte ed in specifici settori come quelli indicati sulla base dei dati ottenuti nelle due zone in cui sono stati svolte i test con perturbazione idrodinamica. Va infatti sottolineato che, nelle aree più contaminate, il continuo pompaggio e trattamento delle acque interessate dall'inquinamento produce comunque una riduzione della massa inquinante presente, come sembra chiaramente emergere dagli andamenti rilevati. Laddove invece il gestore ha dovuto abbandonare l'uso dei pozzi si è riscontrato un incremento delle concentrazioni presenti per possibili fenomeni di accumulo locale.

Un ultimo aspetto da sottolineare è che in funzione degli elementi emersi sarebbe opportuna la conduzione di specifiche indagini di approfondimento, che consentirebbero una migliore comprensione del meccanismo di presa in carico del tetracloroetilene da parte delle acque. Si fa in particolar modo riferimento ai processi che legano le acque di infiltrazione locale con l'evoluzione temporale delle concentrazioni di questo contaminante. In tal senso, oltre allo svolgimento di ulteriori stress-test nelle aree a maggiore inquinamento, un monitoraggio sistematico quantitativo, chimico ed isotopico, a cadenza quantomeno mensile, sulle acque di falda da prelevare su una selezione di pozzi e sulle precipitazioni meteoriche, permetterebbe di chiarire meglio tali processi e faciliterebbe l'identificazione delle fonti di inquinamento. A tale scopo riteniamo che la terebrazione di pozzi/piezometri con fenestrazioni limitate a definiti orizzonti permeabili consentirebbe un monitoraggio qualitativo/quantitativo di più chiara interpretazione. Dalle campagne di indagine compiute sembrerebbe possibile l'identificazione più puntuale delle aree inquinate, che oggi fungono sostanzialmente da fonti inquinanti. Infine, un campionamento dei terreni a profondità diverse potrebbe fornire ulteriori utili indizi.

## 7 BIBLIOGRAFIA

*Capecchi F., Guazzone G. & Pranzini G. (1975).* Il bacino lacustre di Firenze-Prato-Pistoia. Geologia del sottosuolo e ricostruzione evolutiva. Boll. Soc. Geol. It., 94, 637-660.

*Cerrina Feroni A., Da Prato S., Doveri M., Ellero A., Lelli M., Marini L., Masetti G., Nisi B., Raco B., Baietto A., Irace A., Perello P., Piana F., Varrone D. (2010)* - Caratterizzazione geologica, idrogeologica e idrogeochimica dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi della Regione Toscana (CISS): 11AR011+11AR012+11AR013 "Acquifero della Piana di Firenze, Prato, Pistoia" – Zona Firenze, Zona Prato e Zona Pistoia. Rapporto tecnico CNR-IGG n. 10939 del 11/11/2010 (Convenzione IGG/Lamma del 15/01/2010), pp. 95.

*Da Prato S., Doveri M., Ellero A., Lelli M., Masetti G., Menichini M., Nisi B., Raco B. (2012)* – Integrazioni alla "Caratterizzazione geologica, idrogeologica e idrogeochimica dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi della Regione Toscana (CISS)". 11AR011 "Corpo idrico della Piana Firenze, Prato, Pistoia – zona Firenze", 11AR012 "Corpo idrico della Piana Firenze, Prato, Pistoia – zona Prato", 11AR013 "Corpo idrico della Piana Firenze, Prato, Pistoia – zona Pistoia". Rapporto tecnico CNR-IGG n° 10975 del 31/12/2012 (Convenzione IGG/Lamma del 14/09/2012), pp. 18

*Doveri M. (2006)* Progetto per lo studio e l'analisi delle risorse idriche della Provincia di Prato con riferimento all'archivio storico del Demanio Idrico. Relazione attività svolta nell'ambito del contratto di collaborazione 20/12/2005 Rep. N. 54, 43pp.

*Gargini A., Berrettini S., Mazzoni M., Piccinini L., Zavatti A., Pucci B., Vincenzi V. (2011).* Realizzazione dello studio idrogeologico delle principali risorse idriche del territorio della Provincia di Prato. Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico – Ambientali - UniBologna, Consorzio Ferrara Ricerche, Hydrogea Vision srl, Provincia di Prato . Relazione finale riveduta ed integrata, pp. 128.

*Gargini A., Landini F., Pranzini G. (1995).* Studio idrogeologico del territorio di Prato per la valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi mediante un sistema parametrico. Atti del 2° Convegno nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee: metodologia, tecnologie e obiettivi. Nonantola (Modena), 17-18-19 Maggio 1995. Estratto da: Quaderni di Geologia Applicata, 1995 Pitagora Editrice, Bologna.

*Landini F. (2005).* Indagini geologiche, idrogeologiche e progettazione di un sistema sperimentale di ricarica artificiale per un acquifero poroso sovrasfruttato nel Medio Valdarno, con verifica dell'esercizio dell'impianto. Tesi di Dottorato, Università di Firenze, XVI ciclo. Tutore Prof. G. Pranzini.

*Landini F., Pranzini G., Venturucci E. (1990).* La falda idrica della conoide di Prato (Firenze). Acque sotterranee, Il trim. (giugno 1990), pagg. 48-70.

*Lubello C. (1993).* L'inquinamento da organoalogenati dell'acquifero pratese. Acque Sotterranee, anno X, marzo 1993, pagg.47-52.