



**ARPAT**

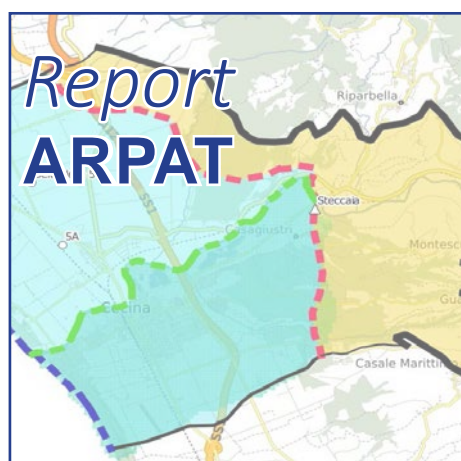
Agenzia regionale  
per la protezione ambientale  
della Toscana

REGIONE  
TOSCANA



# Modellistica idrogeologica per la gestione della disponibilità delle risorse idriche

## Relazione finale 2018



# **Modellistica idrogeologica per la gestione della disponibilità delle risorse idriche**

## **Relazione finale 2018**

Firenze, 2018



## **Modellistica idrogeologica per la gestione della disponibilità delle risorse idriche**

### **Relazione finale 2018**

**Autori:**

*Stefano Menichetti* - ARPAT, Direzione tecnica, SIRA

*Stefano Tessitore* - ARPAT, Direzione tecnica, VIA-VAS

**ARPAT - Agenzia regionale per la protezione ambientale della Toscana**

**Direzione generale**

**via N. Porpora 22, 50144 Firenze**

**tel. 05532061 - fax. 0553206324**

**[www.arpat.toscana.it](http://www.arpat.toscana.it)**

## Indice generale

SINTESI.....	5
INTRODUZIONE.....	10
Attività.....	10
Materiali e Metodi.....	12
Software.....	12
ELABORAZIONI.....	15
Modellazione Concettuale.....	15
Studio delle serie temporali.....	16
Decomposizione delle serie temporali.....	18
Autocorrelazione.....	21
Correlogrammi.....	22
Modellazione numerica.....	24
Geometria, trasmissività e storatività dei sistemi acquiferi.....	24
Forzanti idrologiche e condizioni al contorno.....	30
Ricarica.....	31
Quote idrometriche.....	34
Prelievi.....	35
Altre condizioni a flusso imposto.....	42
Target di calibrazione.....	43
Run e calibrazione modello medio annuale stazionario sul periodo.....	46
Run e calibrazione del modello transitorio.....	52
RISULTATI.....	59
CONCLUSIONI.....	68
BIBLIOGRAFIA.....	71

## SINTESI

Il presente rapporto conclude le attività istituzionali non obbligatorie (INO) realizzate da ARPAT per Regione Toscana come da Decreto Dirigenziale di RT n° 9987 del 5/2/2017.

Il modello idrogeologico “CCV - Cecina Valle”, compreso tra ponte della Steccaia ed il mare e corrispondente agli acquiferi M, A e B dell'Autorità di Bacino Regionale Toscana Costa è stato aggiornato al 31/12/2017 sulla base di nuovi dati derivati dalle stazioni SIR, da elaborazioni modellistiche e dai prelievi da pozzi forniti dal gestore ASA e dal Genio Civile. In questo modo il periodo analizzato si estende per **13 anni** dal 01/01/2005 al 31/12/2017.

La metodologia di studio è stata articolata in due fasi principali: la prima finalizzata alla definizione del modello concettuale del sistema acquifero, mentre la seconda ha riguardato lo sviluppo e la taratura del modello di flusso in regime stazionario e transitorio.

### Modello concettuale

Il modello concettuale dell'acquifero della Pianura di Cecina è rappresentato da un sistema **multistrato** a comportamento idrodinamico **monofalda** con limite inferiore costituito da una base argillosa acquicluda di età variabile dal pliocene (argille azzurre) al pleistocene inferiore (argille ad artica).

Le proprietà geometriche ed idrauliche del sistema acquifero sono state derivate dai precedenti modelli. Un'analisi statistica pur confermando la generale correlazione tra le diverse ricostruzioni, evidenzia alcune **differenze** discrete con limiti di accordo nell'ordine della **decina di metri**.

La morfologia del bottom è caratterizzata da una **profonda incisione** sotto l'abitato di Cecina avente direzione NNW-SSE, che si biforca verso NW secondo la morfostruttura del “**vallone Belvedere**” (ARPAT, 2003) e verso NE (direzione Steccaia), lungo una probabile struttura di **paleoalveo del Cecina**.

Più regolare la morfologia del top che si presenta **subpianeggiante** per un'ampia area in prossimità della Mazzanta ed in rialzo seguendo la morfologia attuale verso E e verso NE.

Le conducibilità idrauliche medie derivate dai due precedenti modelli ARPAT (2003, 2014) hanno valori in sx idrografica molto più alti rispetto a quelli in dx idrografica. È stata pertanto effettuata una nuova interpolazione basandosi, sia sui valori misurati sia su quelli stimati dal db stratigrafico. Successivamente sono state individuate 3 zone omogenee sulla base della carta geologica e dei precedenti studi (ARPAT 2003, 2014) ed a queste assegnate **valori medi rappresentativi**

La **ricarica** del sistema acquifero avviene principalmente per infiltrazione diretta delle acque meteoriche e secondariamente per i **contributi** delle **colline** sabbiose retrostanti.

Di particolare rilievo è la **connessione idraulica** con il Fiume **Cecina** che avviene sia in modalità di alimentazione che di drenaggio.

Lo studio delle serie temporali ha evidenziato l'esistenza di periodicità pluriennali, con il **2011 e 2014 come anni di massimo** e il **2012 come anno di magra**. Le stagionalità delle piogge e dei deflussi superficiali presentano **massimi** in **ottobre, novembre** e **minimi** estivi in **agosto, settembre**.

Le serie temporali più complete indicano, attraverso l'analisi dell'autocorrelazione, **periodicità** statisticamente significative nell'ordine di **4 – 5 anni**. La cross correlazione piogge – livelli ha evidenziato inoltre un **ritardo importante** per la freatimetria pari almeno a **tre mesi**.

Le elaborazioni condotte sulle serie temporali hanno confermato la scelta, già impiegata nei modelli originari, di utilizzare **stress periods di durata trimestrale**.

## **Modello di flusso**

La modellazione con MODFLOW non contempla il flusso nel mezzo insaturo e l'applicazione della ricarica è pertanto assunta come immediata all'interno dello stress period.

Si è proceduto così nella **aggregazione** delle diverse **variabili** su base **trimestrale stagionale** di 13 annualità (2005 - 2017) per un totale di 52 stress periods e, in seguito, nella determinazione di **valori medi annui del periodo**.

I **dati di ricarica**, derivati in particolare dal precedente modello in sx (ARPAT, 2014) e disponibili fino al 2014, sono stati estrapolati sulla base di una **regressione** sui **dati di pioggia**.

Per i dati idrometrici, invece, l'estensione 2014-2017 è stata realizzata con i **dati misurati** all'idrometro di **Steccaia**.

I dati dei prelievi ottenuti dal Gestore ASA come dal Genio Civile generalmente su base annuale, ma in alcuni casi anche su base mensile, sono stati riuniti o suddivisi su base trimestrale. Per il consumo idropotabile un **fattore di stagionalità** legato alla vocazione turistica dell'area è stato calcolato per i periodi dove risultavano disponibili dati mensili ed applicato ai restanti dati.

È stata altresì **ricostruita** la serie temporale dei **prelievi** della importante **barriera idraulica** del sito contaminato **Poggio Gagliardo**.

Per quanto riguarda i target di calibrazione è stata evidenziata l'attuale **assenza** di **stazioni** del **monitoraggio freaticometrico** nella porzione in **sx del Fiume Cecina**. Si tratta di una assenza critica, già fatta presente agli uffici competenti del SIR, ai fini dell'affidabilità dei risultati del modello, ed a cui si è fatto fronte, al momento, integrando registrazioni piezometriche relative agli anni 2012 e 2013 condotte dal Genio Civile di RT.

Per la **calibrazione** del modello **stazionario** basato sui valori medi del periodo è stato necessario operare una **riduzione** del **50% della conduttività del terrazzo recente** (zona 2) e del **25% della conduttività del terrazzo antico** (zona 1). Nel complesso l'**iniziale calibrazione del modello stazionario** appare già **soddisfacente** con una media dei residui  $< 0,2$  m. Tuttavia, nel dettaglio, è stata ricercata una **calibrazione** più **spinta** della **conduttività** idraulica, tramite **PEST**, in corrispondenza dei **target transitori più importanti** quali le stazioni SIR e le misure 2012-2013 nell'area di Poggio Gagliardo.

Il modello transitorio consiste di un primo stress period stazionario e successivi 52 stress periods trimestrali per 13 annualità dal 2005 al 2017. I **risultati iniziali** della **modellazione in transitorio** hanno evidenziato **distanze** tra il **modello** e la **realtà**, generalmente in termini di **ridotta escursione** dei livelli piezometrici .

In particolare per la stazione Acquerta si è notata una risposta con valori di picco decisamente attenuati, che è stata ricondotta ad un valore in eccesso del parametro conduttanza utilizzato nella condizione al contorno *river*.

La **calibrazione** condotta con procedura automatica di modellazione inversa, tramite il codice **PEST**, ha modificato, oltre a quattro zone di **storatività**, cinque tratti di **conduttanza** del *river*.

È stata inoltre ridefinita la conduttività media verticale della copertura dell'acquifero, nei termini e con la formulazione più specifica della leakance.

I risultati ottenuti con le calibrazioni di conduttanza e storatività sono risultati nel complesso soddisfacenti, con un netto miglioramento sulla stazione Acquerta e, seppur in modo più contenuto, anche su gli altri target.

La modifica sensibile del parametro della conduttanza del river ha imposto, inoltre, una nuova verifica, anche in termini di bilancio, del modello stazionario precedentemente calibrato. I risultati

hanno confermato una relativa invarianza rispetto ai dati stazionari, o comunque un leggero miglioramento.

I dati di **bilancio** complessivi del **modello stazionario**, basato sulle **medie** del periodo **2005-2017**, hanno evidenziato come le condizioni **river** e **recharge** contribuiscano a ricaricare il sistema in misura simile con circa 12 e 10 Mmc su base annua, rispettivamente. Un contributo minore deriva dai **rilievi collinari** e pari a 3,1 Mmc.

Il fiume rappresenta la principale uscita con 14 Mmc, sebbene i **prelievi** da pozzi estraggono una quantità notevole di 7 Mmc. Il **deflusso a mare** è valutato in 4 Mmc.

Il bilancio idrico in stato stazionario è completato con l'**analisi** in **transitorio** sul lungo periodo simulato che rende evidente la **funzione regolatrice** del sistema acquifero con l'incremento dell'**immagazzinamento** nei periodi di forte ricarica ed il rilascio di acqua, a compensazione, nelle fasi di forte magra.

L'analisi delle mappe piezometriche simulate ha altresì evidenziato nei periodi di scarsa ricarica, come la fine estate 2012, il possibile innesco di locali fenomeni di ingressione di acqua salata per "upconing" nell'area a Nord di San Pietro in Palazzi e nel centro abitato di Cecina.

Secondo quanto indicato da ARPAE (2010) sono state evidenziate le **potenzialità** dei **modelli numerici idrogeologici** sviluppati, in regime stazionario e transitorio, come strumento specialistico per la **gestione** degli **attingimenti** idrici.

È stato calcolato per il sistema acquifero Cecina Valle l'idrogramma dell'**immagazzinamento netto cumulato** permettendo di analizzare nel dettaglio la **funzione serbatoio** del corpo idrico.

Applicando alla serie temporale dell'immagazzinamento netto cumulato la stessa tecnica di decomposizione già utilizzata per le registrazioni idrometriche sono state determinate analiticamente le escursioni nel periodo delle componenti trend e seasonal che rappresentano rispettivamente, la **riserva regolatrice**  $W_r$  (2,5 Mmc) con le sue oscillazioni pluriennali e la **risorsa dinamica**  $W_d$  (22 Mmc) a carattere stagionale.

Assumendo come riferimento lo stesso episodio critico di fine estate 2012, calcolando la differenza tra la superficie di bottom e la corrispondente piezometria, si è ottenuto un quantitativo di **riserva permanente**  $W_p$  pari a 277 Mmc di cui il 2,5 % in pressione (7 Mmc)

Tali valori possono essere confrontati con i **volumi di prelievo**  $Q$ , compresi tra 4,8 ed 8,8 Mmc per una media di 6,4 Mmc nel periodo modellizzato, ottenendo:

$$W_d < Q < W_r/2$$

I prelievi **eccedono normalmente** la **risorsa dinamica** indicano la possibilità su scala pluriennale di condizione di potenziale stress. D'altro lato i volumi di prelievo **non sembrano eccedere** la **riserva regolatrice media**, garantendo verosimilmente su cicli pluriennali il riassorbimento di deficit temporanei.

In particolari **condizioni avverse** con ripetuti trend climatici negativi, è comunque necessario **monitorare** la riserva idrica **regolatrice**, intervenendo con anticipo sulla gestione dei prelievi. Il tempo di **esaurimento** ( $W_r/Q$ ) è infatti compreso mediamente **tra** poco meno di **due** anni e non più di **cinque - sei anni**.

Lo stesso bilancio analitico è stato realizzato anche su **porzioni** discrete del sistema acquifero come rappresentate, ad esempio, dai **corpi idrici** già identificati dalla Autorità di Bacino (**A, B, M**).

Il corpo idrico **A** presenta la **maggiore** capacità di **immagazzinamento** ma è quello **maggiormente dipendente** alla **ricarica**, in presenza di eventi critici, come il **2012**, ha mostrato una forte escursione con un **minimo** molto **pronunciato**.

Il corpo idrico **M** di spessori e dimensioni minori ha una **capacità** di **immagazzinamento** molto più **limitata**, ma la sua diretta **connessione** con il fiume **Cecina** ha permesso negli anni una relativa **costanza** dei **livelli idrometrici** che appaiono, nel complesso, in generale incremento.

Il corpo idrico **B** ha caratteristiche **intermedie** tra quelle dei corpi idrici A e B, mostrando una discreta capacità di immagazzinamento. La connessione seppure indiretta con il fiume Cecina gli ha permesso nel 2012 di non raggiungere il minimo idrico assoluto.

## INTRODUZIONE

Con il presente rapporto si illustrano i risultati conclusivi delle attività INO (Istituzionali Non Obbligatorie) previste dall'allegato al Decreto Dirigenziale di RT n°9987 del 5/07/2017 "Attuazione allegato C alla DGRT n. 1420/2016. Contributo ad ARPAT per le attività 2017 di monitoraggio delle acque interne (superficiali e sotterranee)", in particolare la scheda di progetto denominata "Modellistica idrogeologica per la gestione della disponibilità delle risorse idriche".

Gli obiettivi riguardano l'aggiornamento del modello idrogeologico del sistema idrico della Val di Cecina e della Pianura Costiera, implementandolo con i nuovi dati di misura (freatimetrica, idrometrica, delle portate prelevate e per la parte di valle e di pianura costiera con i dati di monitoraggio resi disponibili dalle attività di bonifica dell'area di Poggio Gagliardo) in modo che possa essere di supporto alla gestione dinamica della risorsa idrica.

L'attività costituisce il proseguimento di un precedente studio ARPAT (2016) "Modellistica del Bacino del Cecina per la tutela quantitativa e l'ottimale gestione delle risorse idriche della Val di Cecina e nella fascia costiera livornese compresa tra Rosignano e Bibbona" relativo a due modelli distinti :

- CCM "Cecina Monte", compreso tra il Ponte di Monterufoli e la confluenza dello Zambra e corrispondente all'acquifero K dell'individuazione dell'Autorità di Bacino Regionale Toscana Costa;
- CCV "Cecina Valle", compreso tra Ponte della Steccaia ed il Mare e corrispondente agli acquiferi M, A e B dell'Autorità di Bacino Regionale Toscana Costa.

## Attività

Sono state previste due fasi di lavoro:

- FASE I: Descrizione delle attività, delle metodologie adottate e del programma di attuazione.
- FASE II: Relazione tecnica finale descrittiva delle attività svolte e degli esiti dei monitoraggi effettuati, con valutazione ed analisi dei risultati. Rendicontazione delle modalità di spesa del contributo erogato.

La prima fase è stata oggetto di un precedente rapporto ARPAT (2017), il presente rapporto finale riguarda la seconda fase conclusiva relativa al Modello Cecina Valle.

Alcuni risultati del presente rapporto sono stati anticipati per un precedente contributo istruttorio realizzato da ARPAT (2018), relativo ad una richiesta di impiego del modello scaturita dalla riunione dell'11 settembre 2018 del Comitato tecnico per l'attuazione degli interventi di bonifica di Poggio Gagliardo.

In quell'occasione, infatti, il Genio Civile Valdarno Inferiore e Costa aveva indicato come, per la conclusione di un istruttoria di richiesta di concessione di attingimento per un pozzo profondo ad uso potabile presso Cecina, risultasse necessario, in accordo con ARPAT stessa, un approfondimento al fine di valutare gli effetti di tale pozzo sul pennacchio di contaminazione.

La Regione ha così condiviso nel Comitato l'opportunità di una verifica con il modello idrogeologico in corso di aggiornamento, richiedendo ad ARPAT di anticipare le verifiche necessarie.

ARPAT ha prodotto il contributo istruttorio del 12/10/2018, sulla base del modello stazionario disponibile a quella data, demandando per ulteriori approfondimenti alla consegna del presente rapporto.

## Materiali e Metodi

### Software

Per il presente studio sono utilizzati in prevalenza codici di calcolo di pubblico dominio come MODFLOW, QGIS, FREEWAT ed R.



**MODFLOW** (Harbaugh & McDonald, 1996) è un modello di acque sotterranee tridimensionale alle differenze finite del Servizio Geologico statunitense, USGS, considerato uno standard internazionale per la simulazione e la previsione delle condizioni delle acque sotterranee.

La struttura modulare di MODFLOW ha permesso negli anni una potente integrazione di funzionalità per simulare sistemi accoppiati acque sotterranee/superficiali, trasporti soluto e densità variabile, compattazione dei terreni, stima dei parametri e gestione delle acque sotterranee. In particolare il modulo aggiuntivo dello Stream Routing Package STR1 (Prudic, 1989) permette di valutare in modo completo gli scambi fiume falda, determinando la portata liquida nel corso d'acqua in conseguenza degli scambi con la falda e limitando la ricarica della falda alla portata liquida effettivamente disponibile.



**QGIS** è un Sistema di Informazione Geografica Open Source rilasciato sotto la GNU General Public License. QGIS è un progetto ufficiale della Open Source Geospatial Foundation(OSGeo), è in grado di funzionare su Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android e supporta numerosi formati vettoriali, raster, database e funzionalità. QGIS offre un numero in continua crescita di funzionalità dal programma principale e dai plugin. Attraverso il software è possibile visualizzare, gestire, modificare, analizzare dati e comporre mappe stampabili. ([www.qgis.org/it/site/about/index.html](http://www.qgis.org/it/site/about/index.html)).



**FREEWAT** è un progetto HORIZON 2020, finanziato dalla Commissione Europea; rappresenta un ambiente di modellazione integrata GIS open source e di dominio pubblico per la simulazione della quantità e della qualità delle acque sotterranee con un modulo integrato di gestione della risorsa.

FREEWAT è un plugin per QGIS progettato come un insieme modulare di strumenti per:

- l'analisi, l'interpretazione e la visualizzazione di dati idrogeologici e idrochimici e di qualità, anche incentrati su un'analisi avanzata delle serie temporali, integrata nel modulo akvaGIS.
- la simulazione di modelli relativi al ciclo idrologico e alla gestione delle risorse idriche: modelli di flusso, modelli di trasporto, modelli di crescita delle colture, modelli di gestione e ottimizzazione (anche legati alla gestione dell'irrigazione e alle problematiche rurali).
- eseguire la calibrazione del modello, l'analisi di sensibilità e quantificazioni di incertezza.

In accordo con gli uffici regionali, il modello è reso disponibile anche come file sqlite di freewat.



Il software **R** deriva da S, un linguaggio ed un sistema sviluppati da John Chambers e collaboratori negli anni '80 presso i Laboratori Bell. R è un progetto Open Source, conforme per la maggior parte ad S. Sviluppato inizialmente da Ross Ihaka and Robert Gentleman all'Università di Auckland (Nuova Zelanda), è attualmente sviluppato da una ampia comunità internazionale di ricercatori e sviluppatori in ambito sia accademico sia industriale.

Il software R opera attraverso il web ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)), disponibile per Windows, Macintosh e Linux, è facilmente installabile sul proprio pc dal sito <http://cran.r-project.org/>.

Attraverso la conoscenza delle caratteristiche fondamentali del linguaggio è possibile sviluppare semplici programmi in R. Il linguaggio R è applicabile a problemi rilevanti in ambito ambientale e, attraverso le numerose librerie scaricabili, è possibile eseguire la maggior parte delle analisi

geospaziali, statistiche e geostatistiche necessarie. R è un programma per la grafica e fornisce un ambiente integrato per l'elaborazione interattiva di dati e la visualizzazione di grafici, inoltre dispone anche di interfacce verso programmi e moduli scritti con altri linguaggi.



Un ulteriore software proprietario è rappresentato infine da Groundwater Vistas, interfaccia per il codice di calcolo MODFLOW sviluppata da Jim e Doug Runnagh della ESI international.

## ELABORAZIONI

### Modellazione Concettuale

Il modello “Cecina Valle” corrisponde all’insieme dei tre corpi idrici indicati dalla ex Autorità di Bacino Regionale Toscana Costa (A+B+M). Nella figura 1 sono rappresentate con diversa simbologia le condizioni al contorno ed indicate le stazioni SIR rilevanti per il modello, quali l'idrometro di Steccaia che governa i carichi della condizione “river” e i freatimetri 5A e Belvedere utilizzati come targets.

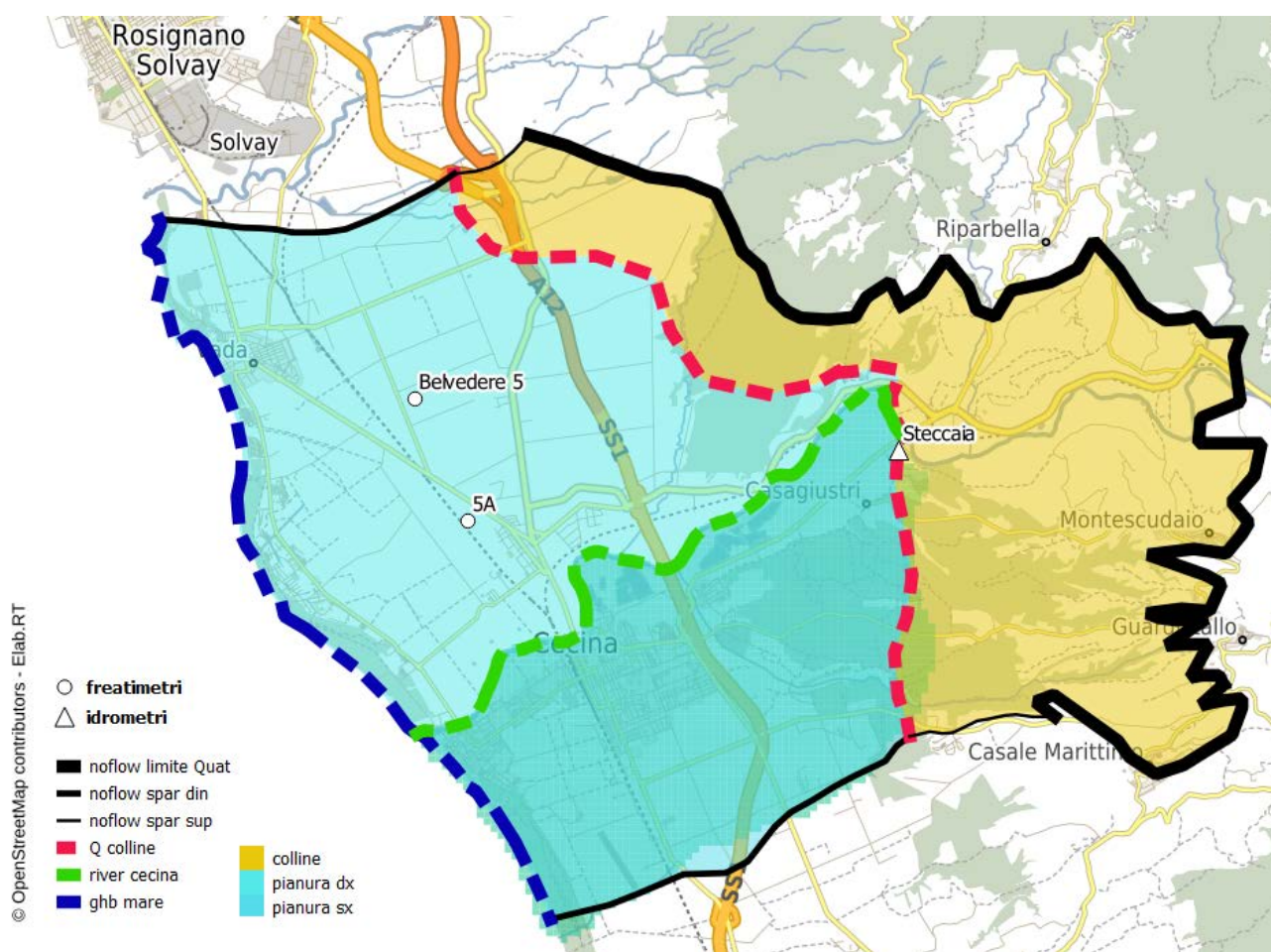


Figura 1: Modello Concettuale e condizioni al contorno

In sintesi, per il sistema acquifero multistrato della pianura costiera di Cecina è riconosciuto nel complesso un carattere monofalda con una base argillosa acquicluda di età variabile dal pliocene (argille azzurre) al pleistocene inferiore (argille ad artica).

Il dominio modellistico è così diviso :

- area della pianura dove il sistema acquifero di maggiore spessore e regolarità è ben conosciuto in virtù dei numerosi pozzi realizzati;
- area collinare che contribuisce attraverso l'infiltrazione alla ricarica del sistema acquifero ma dove le più limitate conoscenze consentono una sola valutazione complessiva in termini di condizioni di flusso imposto.

Il sistema acquifero è in collegamento con il Fiume Cecina, soprattutto nella parte apicale, mentre verso valle gli scambi sono progressivamente limitati da una copertura acquicluda acquitarda che aumenta di spessore.

Il fiume determina quindi una condizione di carico imposto secondo un profilo idrometrico derivato dall'idrometro SIR della Steccaia; il flusso di scambio, dipendente dal carico, è mediato dagli spessori della copertura del sistema acquifero.

Una ulteriore condizione di carico imposto è data dal mare mentre condizioni di non flusso, lungo spartiacque sotterranei e superficiali, delimitano a nord ed a sud il sistema idrogeologico.

## Studio delle serie temporali

Sono stati acquisiti fino al 31/12/2017 i dati delle seguenti stazioni già indicate sulla base del modello concettuale:

Nome_file	Nome_stazione	Misura	
liv_TOS01005415	Steccaia Q	h idrometrica	mszi
liv_TOS19000601	5A	h freaticometrica	mdpc
liv_TOS19000616	Belvedere 5	h freaticometrica	mdpc
prec_TOS11000002	Cecina	pioggia	mm

*Tabella 1: Stazioni SIR del Modello Concettuale*

I dati in formato csv sono stati riuniti in un'unica forma tabellare e successivamente aggregati in medie o cumulate mensili impostando come criterio di validazione un numero mensile di osservazioni valide giornaliere non inferiore a 20:

Nome stazione	Misura	Periodo	N anni	N anni monitorati	N mesi monitorati	N anni validi	N mesi validi
Steccaia Q	h idrometrica	2009-2017	9	8	92	8	91
5A	h freaticometrica	2004-2017	14	14	146	14	138
Belvedere 5	h freaticometrica	2008-2011	4	4	27	3	21
Cecina	pioggia	2012-2017	6	6	72	6	72

*Tabella 2: Statistiche aggregati mensili*

I plot delle serie temporali sono riportati nelle figure seguenti:

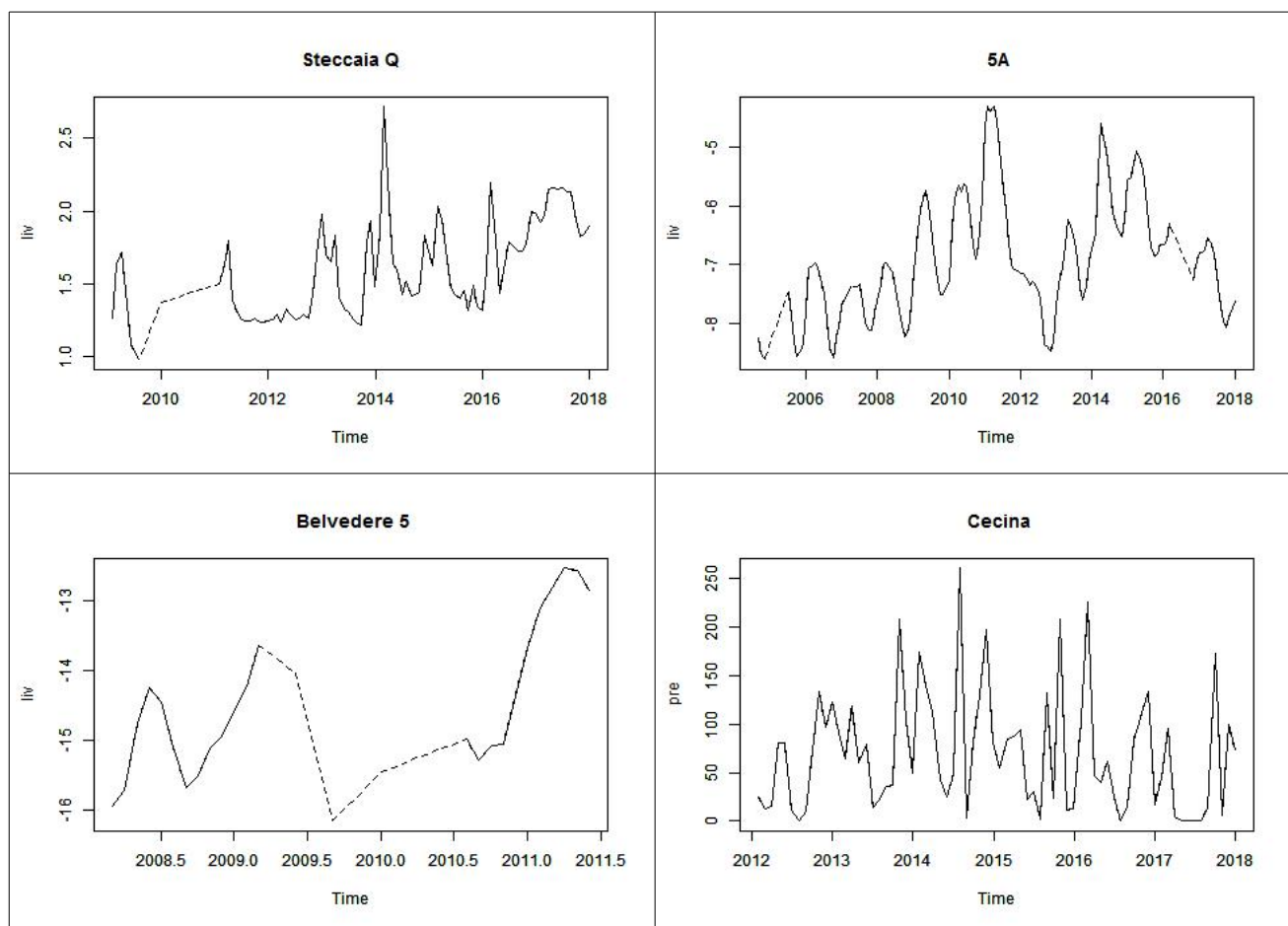


Figura 2: Plot temporali

Attraverso il software R, in particolare il pacchetto “timeseries” (Wuertz *et alii*, 2017), si è proceduto nella ricostruzione della continuità delle serie temporali e nelle seguenti analisi statistiche:

- decomposizione della serie nelle **componenti** trend, stagionalità, casuale;
- autocorrelogrammi della componente di trend per l'evidenziamento di **cicli pluriennali**;
- correlogrammi, per l'evidenziamento e misura di **tempi di ritardo** tra serie diverse (lag time).

## Decomposizione delle serie temporali

La procedura di decomposizione di serie temporali additive, come appare il caso delle variabili in esame, è stata realizzata dal pacchetto "time series" di R. Il risultato è una separazione in tre distinte componenti di **trend**, **stagionale** e **random**.

La componente **trend** evidenzia l'esistenza di cicli pluriennali, tendenze generalizzate all'incremento/decremento monotonicamente e punti di inversione.

La componente **stagionale** si ripete annualmente e identifica mediamente la posizione di minimi e massimi relativi annuali.

Nella componente **random**, infine, anche se quantitativamente subordinata e di più difficile interpretazione rimangono confinati residui ed alterazioni episodiche della serie, comunque di interesse in particolari casi.

La serie temporale 2009-2017 delle **altezze idrometriche** a **Steccaia** (Fig. 3) presenta un trend con cicli pluriennali e tendenza all'incremento, un massimo assoluto è stato raggiunto nel **2017**, massimi relativi nel 2014 e 2011. Minimi assoluti a fine 2009 e nel 2012. La stagionalità ha massimi autunnali (novembre) e minimi tardo estivi (settembre).

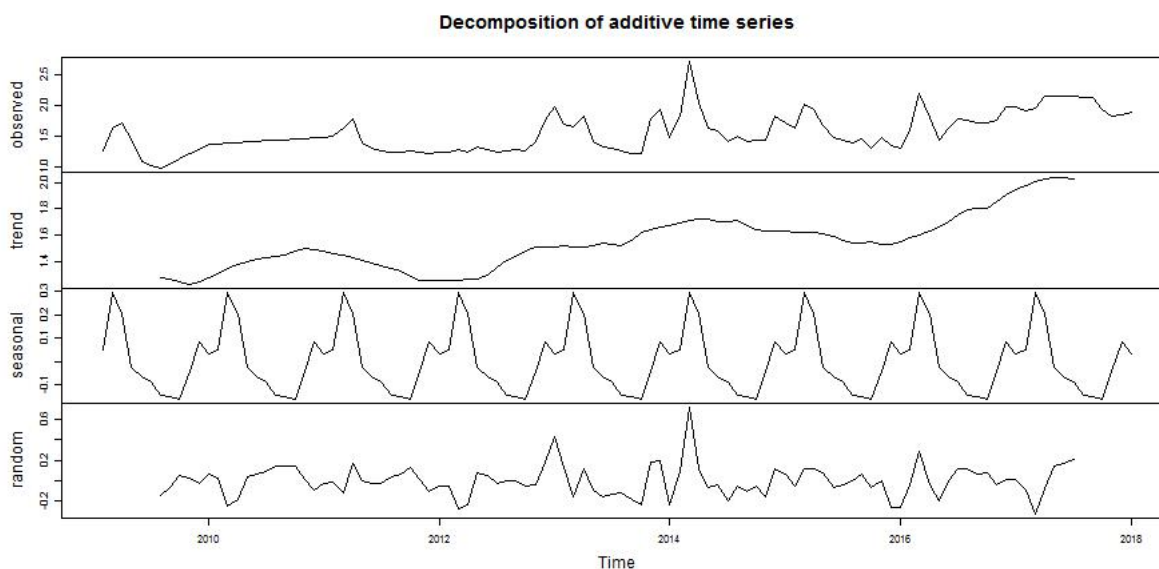


Figura 3: Decomposizione serie temporale idrometro STECCAIA

La serie temporale 2004-2017 delle **altezze piezometriche** sulla stazione **5A** (Fig. 4) ha un trend vario con una tendenza all'incremento dal 2006 al 2011, un profondo minimo nel **2012** ed un

successivo massimo nel 2014. La stagionalità ha massimi tardo invernali (marzo) e minimi tardo estivi (settembre).

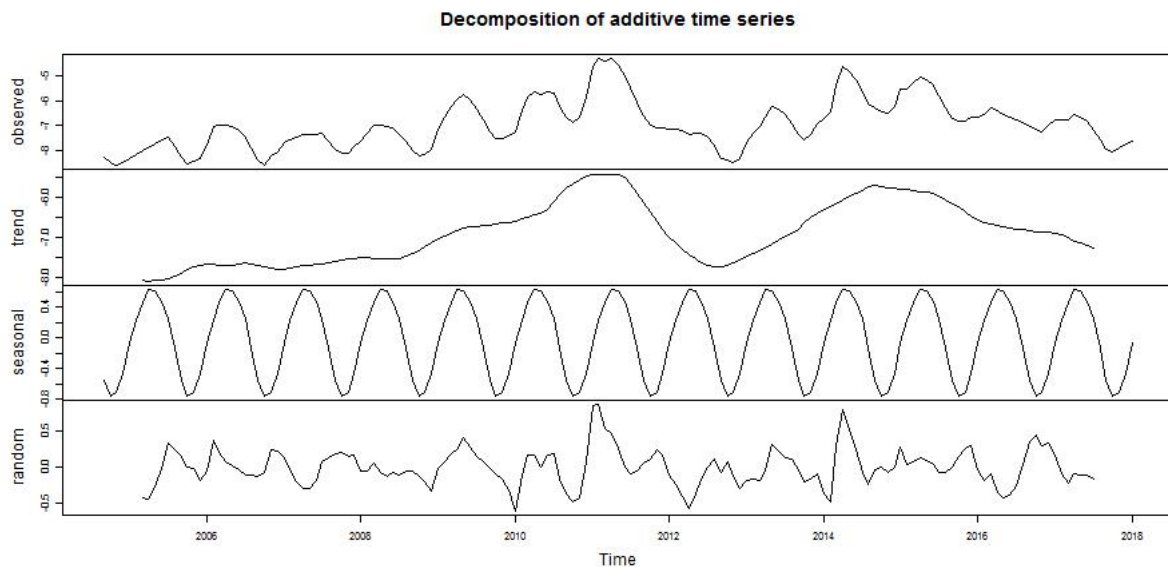


Figura 4: Decomposizione serie temporale freatimetro 5A

La limitata serie temporale **2008-2011** del **freatimetro belvedere 5** (Fig. 5) mostra un minimo accenno di trend pluriennale ed una stagionalità varia con una tendenza all'incremento dal 2006 al 2011. La stagionalità ha massimi invernali (febbraio) e minimi estivi (agosto).

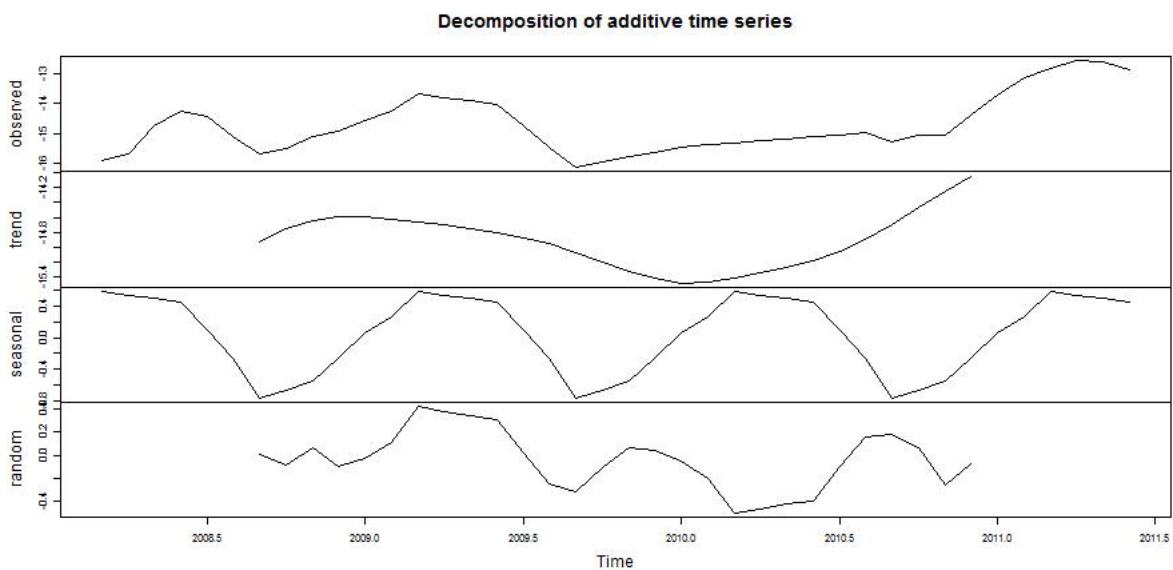


Figura 5: Decomposizione serie temporale freatimetro Belvedere

La serie temporale 2012-2017 del **pluviometro di Cecina** (Fig. 6) mostra un ampio massimo tra 2014 e 2015 seguito da un trend discendente fino ai valori minimi del 2017. La stagionalità ha massimi autunnali (ottobre) e minimi tardo primaverili (giugno) ed estivi (agosto).

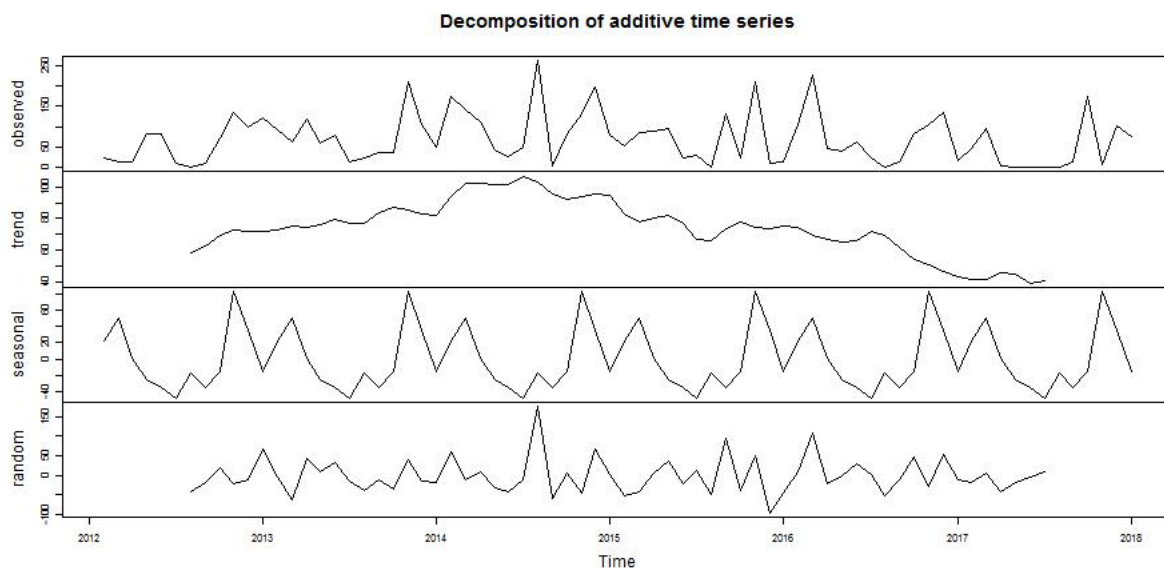


Figura 6: Decomposizione serie temporale pluviometro Cecina

In conclusione, come riassunto nella tabella 3 seguente, si osservano in generale periodicità pluriennali, con il **2011** e il **2014 come anni di massimo**, separati dal **2012 come anno di magra**.

Le stagionalità delle piogge e dei deflussi superficiali si attestano su **massimi** ripetuti nei mesi di **ottobre, novembre e febbraio** e **minimi** estivi in **agosto**. La risposta dei deflussi sotterranei è strettamente connessa a questa stagionalità di superficie: il **minimo deflusso per esaurimento è ritardato** di un **mese (settembre)**, mentre la **ricarica** con i massimi piezometrici, per via della somma dei due massimi pluviometrici autunnali e inizio primaverile segue anche questa, in definitiva un **ritardo** di un **mese (marzo)**.

Nome stazione	Misura	Periodo	Trend pluriennale		Stagionalità	
			massimi	minimi	massimi	minimi
Steccaia Q	h idrometrica	2009-2017	2011 2014 2017	2009 2012	novembre	settembre
5A	h freaticometrica	2004-2017	2014	2012	marzo	settembre
Belvedere 5	h freaticometrica	2008-2011	...	...	febbraio	agosto
Cecina	pioggia	2012-2017	2014 2015	2017	ottobre	giugno agosto

Tabella 3: Risultati studio di decomposizione serie temporali

## Autocorrelazione

Le analisi di autocorrelazione delle serie temporali, in particolare delle componenti di trend, confermano l'esistenza di periodicità pluriennali. I lags indicati nelle figure corrispondono ad un unità di anno solare e le linee tratteggiate il limite di significatività statistica. Un massimo di ACF che supera la soglia di significatività indica per il lag una periodicità completa (massimo - massimo). Viceversa un minimo significativo la presenza di un semiperiodo (massimo – minimo).

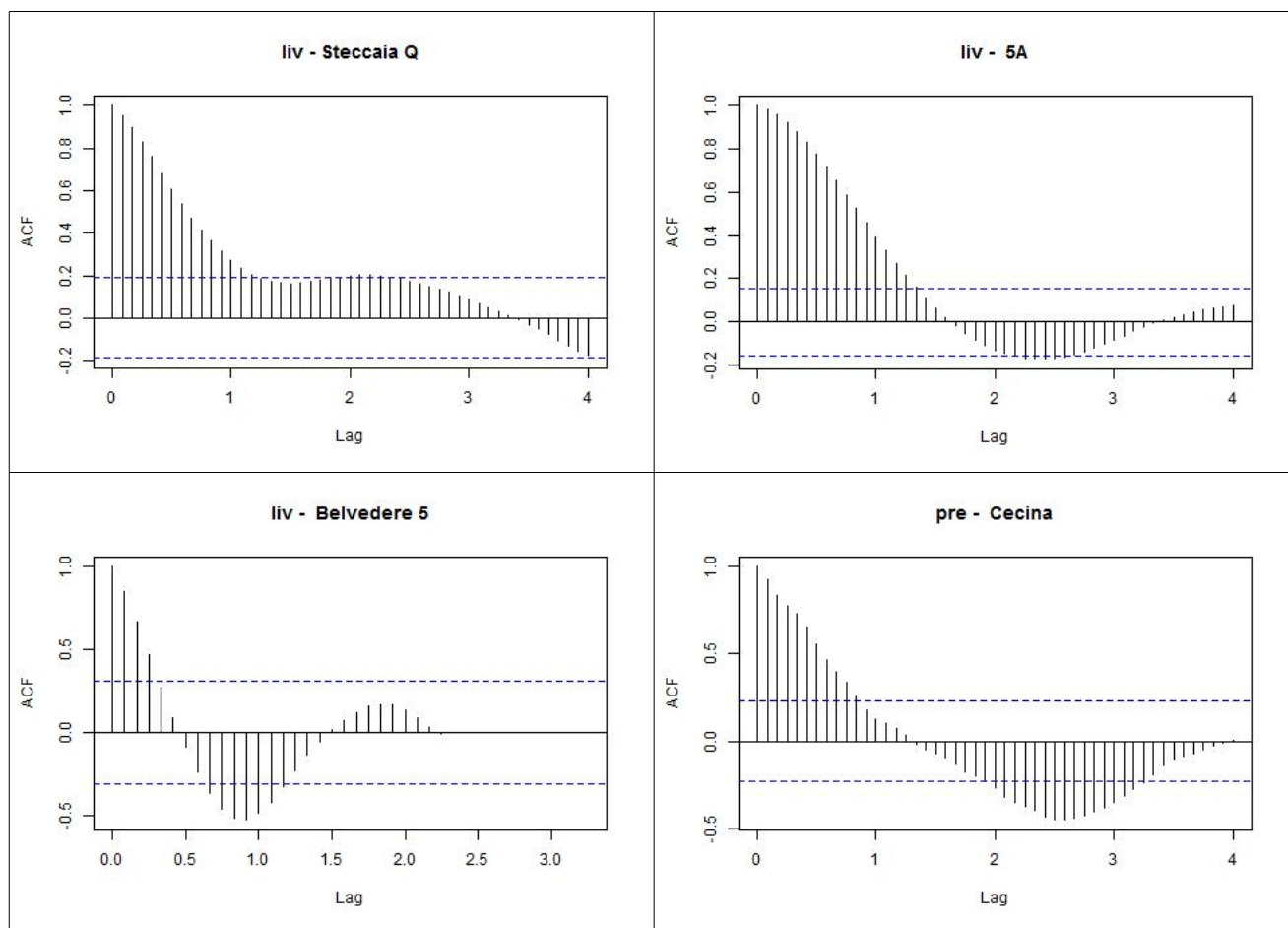


Figura 7: Plot autocorrelazione

I diagrammi per le serie più complete quantificano la durata di cicli pluriennali dove la **componente** più **evidente** appare quella con semiperiodo tra 2 e 2,5 anni (**periodo 4, 5 anni**), ben rappresentata sul **pluviometro Cecina**, e sul **piezometro 5A**.

Il piezometro **belvedere 5** sembra mostrare un ciclo ancora più ristretto con semiperiodo inferiore all'anno di 0,8 (completo **1,6 anni**).

## Correlogrammi

Lo studio di correlogrammi derivati da serie temporali è analogo allo studio dell'autocorrelazione con la variante che la traslazione ripetuta di un definito lag avviene tra una prima ed una seconda serie temporale di diverse stazioni. I lags indicati nelle figure corrispondono a intervalli mensili con una unità ancora pari ad un anno. Le linee tratteggiate indicano soglie di significatività statistica, un massimo di ACF che supera la soglia di significatività indica un lag significativo. Un lag negativo significativo indica un arretramento della prima stazione rispetto alla seconda.

Sono state scelte le stazioni più rappresentative quali:

- prec Cecina > liv Steccaia > liv 5A

L'analisi dei correlogrammi ha così permesso una diretta quantificazione dei tempi di risposta (lag time) tra le diverse variabili, già desunti in via approssimata dalle precedenti elaborazioni.

Sono stati costruiti i correlogrammi:

- prec Cecina > liv Steccaia
- prec Cecina > liv 5A

In questo caso le evidenze risultate dalla figura 8 ci mostrano un **ritardo importante** per la freatimetria nel caso del **sistema costiero**. Le oscillazioni delle precipitazioni al pluviometro Cecina precedono (lag negativo) quelle del livello freatimetrico di 5A di almeno **tre mesi**.

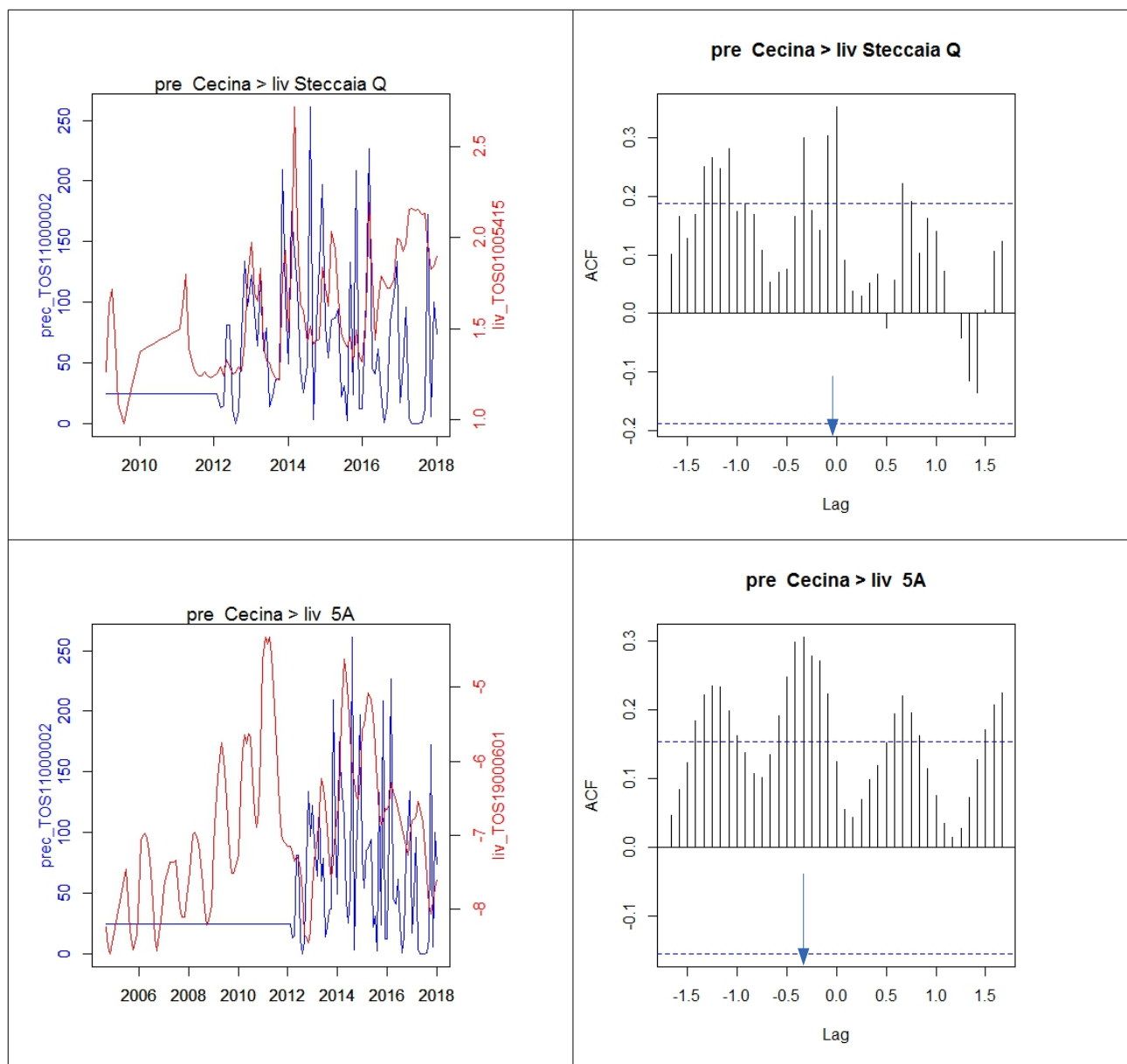


Figura 8: Analisi della cross-correlazione

## Modellazione numerica

### Geometria, trasmissività e storatività dei sistemi acquiferi

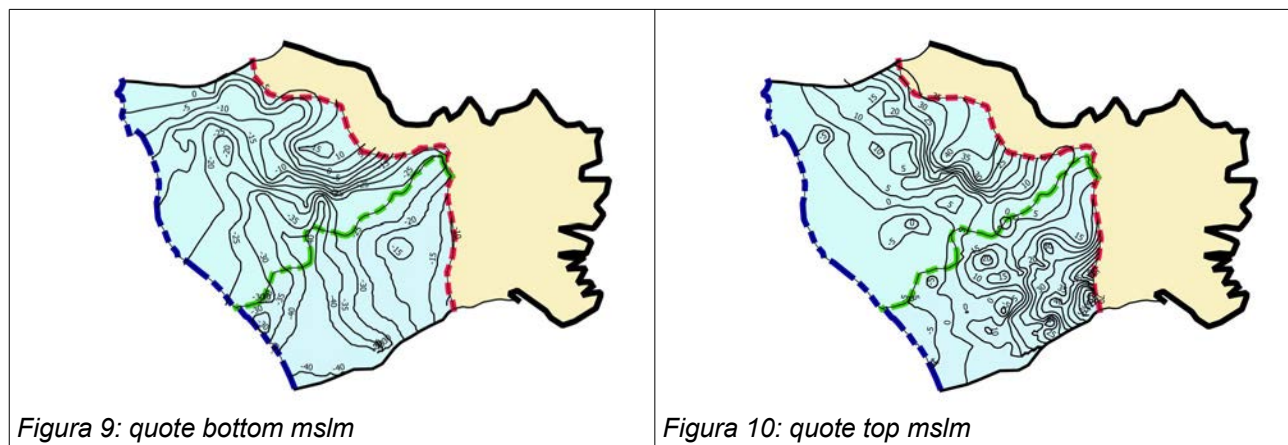
Le proprietà dei due sistemi acquiferi sono derivate dai precedenti modelli; tramite operazioni GIS di unione, verifica e, ove necessario, di nuova interpolazione geostatistica queste proprietà sono state riunite ed adattate ai nuovi domini.

Si tratta delle superfici di tetto e letto (Figg. 9 e 10) degli orizzonti multistrato monofalda che costituisce il sistema acquifero, della conducibilità idraulica media del monolayer e dei parametri di storatività in condizioni freatiche e confinate (porosità efficace e coefficiente di immagazzinamento).

I modelli e le fonti dati utilizzate sono rappresentate da:

- NIT: modello nitrati ARPAT (2003)
- PGG: modello Poggio gagliardo ARPAT (2014)

La ricostruzione geometrica si è basata sulle due fonti provvedendo a riunire e parzialmente modificare linee isobate con intervallo 5 metri.



La morfologia del bottom evidenzia una particolare struttura data da una profonda incisione sotto l'abitato di Cecina di direzione NNW-SSE che si biforca in due direzioni, verso NW secondo la morfostruttura del "vallone Belvedere" già notata nello studio del modello in dx ARPAT (2003) ed in direzione NE, lungo la probabile struttura di paleoalveo del Cecina verso la Steccaia.

È possibile che le profonde incisioni, forse di natura cataglaciale, legate cioè al massimo abbassamento avvenuto all'apice della glaciazione Wurm II, possano corrispondere da un lato al Paleo Fine e dall'altro al Paleo Cecina e nel proseguimento verso SSE della loro confluenza.

La morfologia del top si presenta più regolare, subpianeggiante per un'ampia area in prossimità della Mazzanta ed in rialzo seguendo la morfologia attuale verso E e verso NE.

Una volta completata la ricostruzione si è proceduto ad un confronto con la ricostruzione dei Corpi Idrici Significativi 32CT010 e 32CT030 realizzate da Cerrina Feroni *et alii* (2009) tramite l'analisi statistica delle differenze ottenute da una nuvola di 50 punti campione. I risultati sono così rappresentati nella tabella 4 seguente.

In ambedue i casi benché i valori campionati risultino correlati significativamente le differenze tra le superfici sono discrete, con limiti di accordo nell'ordine della decina di metri, e statisticamente significative negative, con quote più basse della ricostruzione CCV.

Superfici	Differenze				Limiti di accordo Band Alt man		Correlazione Sperma		Differenze t / sin test
	N	Media	CV	Test normalità	inf.	sup.	r	p	
top	49	-2,1	-2,52	0,27 > 0,05 normali	-12	8	0,965	5E-29 << 0,05 correlate	significative
bottom	49	-2,9	-2,59	0,11 > 0,05 normali	-18	12	0,719	7e-6 << 0,05 correlate	significative

Tabella 4: Analisi statistica delle differenze di top e bottom con la ricostruzione dei CISS (Cerrina Feroni *et alii*, 2009)

Nella figura 11 sono meglio descritti i principali scarti sia su mappa che su scatter plot.

Le differenze si presentano distribuite in modo abbastanza casuale, fatta eccezione per alcune aree con maggiori differenze negative localizzate nel caso del top (maggiore copertura in CCV) nell'area ad est di Cecina e per il bottom nell'area di Collemezzano (maggiore profondità di CCV).

Differenze positive sia del top che del bottom si osservano invece lungo pianura alluvionale più recente in dx Cecina dove la ricostruzione CVV riporta questa volta quote più prossime al piano campagna di 8 – 10 m rispetto a CISS.

In quest'ultimo caso si tratta di differenze imputabili anche ad una diversa modellazione concettuale del sistema acquifero già discussa in ARPAT (2014). Il modello PGG, qui trasferito, ha assunto infatti una piena comunicazione nelle aree immediatamente a valle della Steccaia tra i due orizzonti acquiferi che sono separati verso valle da un interstrato acquitardo. Pertanto, includendo nel sistema multistrato anche questo orizzonte superiore le sue quote top risultano più elevate.

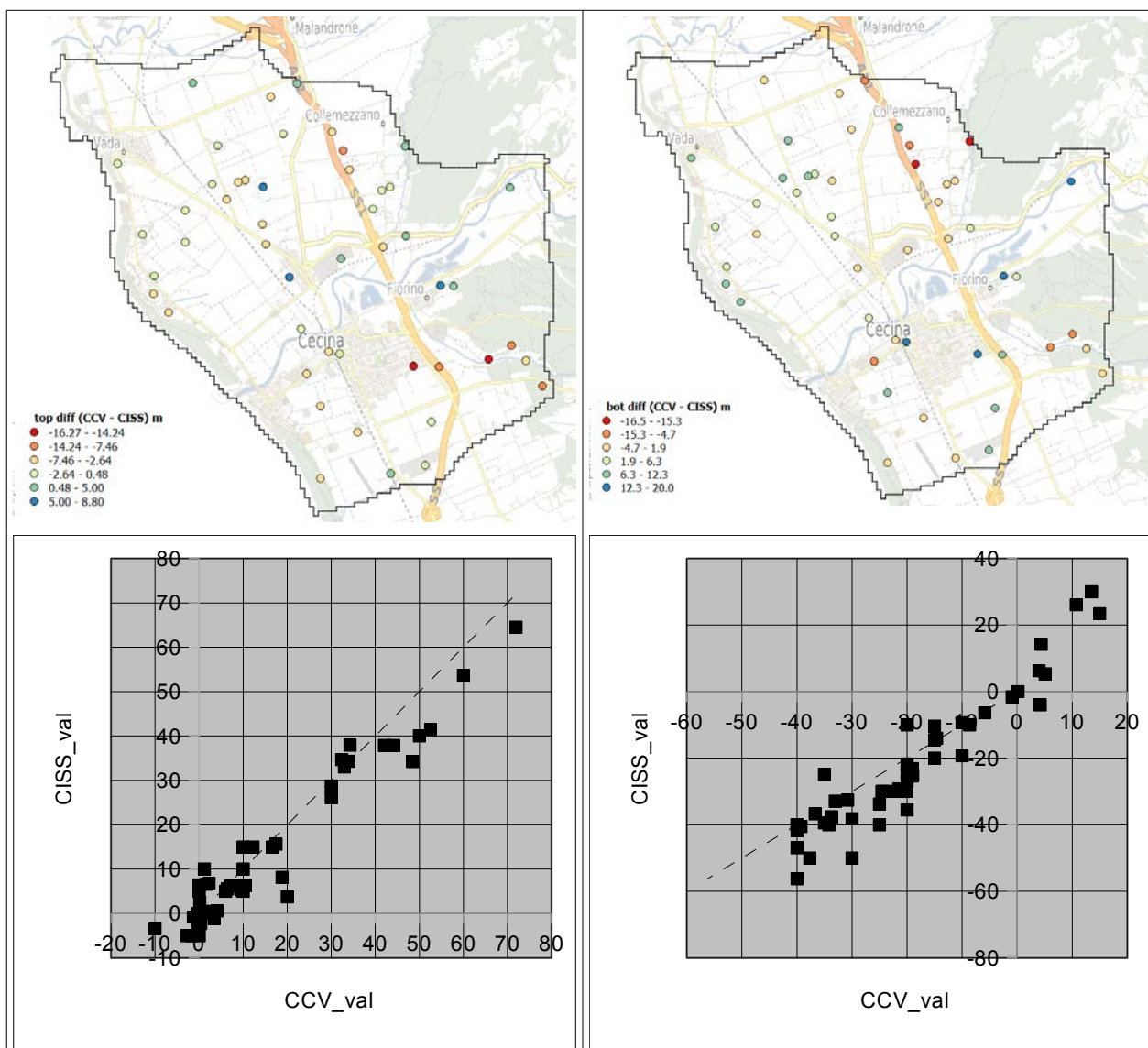


Figura 11: Confronto e validazione tra i modelli geometrici delle superfici di tetto e letto CISS e PGG

Per quanto riguarda la conducibilità idraulica media dell'orizzonte monolayer le distribuzioni ottenute in precedenza dai due modelli in dx e sw del Cecina, non sono risultate perfettamente sovrapponibili. Si ricorda che, come generale caratterizzazione degli orizzonti acquiferi, acquitardi e acquicludi sulla base dell'interpretazione di prove di portata, erano stati ottenuti per il modello NIT i valori rappresentativi riportati nella seguente tabella:

STRATO	Descrizione	Orizzonte saturo K [m/s]	Orizzonte insaturo K [m/s]
ACQUIFERO	Arenarie, ghiaie, sabbie	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
ACQUITARDO	Limi sabbiosi e argillosi, sabbie fini limose e argillose, limi e argille con ghiaie (fessurate nell'insaturo)	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
ACQUICLUDO	Argille, argille limose (fessurate nell'insaturo)	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$

Tabella 5: Classi rappresentative di conducibilità idraulica per il modello NIT in dx del Cecina (ARPAT, 2003)

Mentre nel modello PGG per le diverse litologie acquifere si erano ottenuti:

- ghiaie sciolte del Cecina -  $K = 1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$  m/s = 100 - 1000 m/g
- calcareniti e conglomerati dei terrazzi pleistocenici  $K = 1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$  = 10 – 100 m/g
- sabbie e calcareniti del pleistocene inferiore -  $K = 1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$  - m/s = 0,1 – 1 m/g

Tabella 6: Classi di conducibilità idraulica per il modello PGG in sx del Cecina (ARPAT, 2013)

Durante la calibrazione del modello NIT le conducibilità idrauliche della parte più estesa di terrazzo pleistocenico recente erano state incrementate di un fattore 2, il che conferma le maggiori conducibilità idrauliche riscontrate in sx per gli stessi terrazzi pleistocenici più recenti. D'altro lato le conduttività del terrazzo più antico di Collemezzano erano state, anche queste in calibrazione, ridotte di 1/3.

Nella figura seguente sono riportate, affiancate, le conducibilità idrauliche medie derivate dalle due fonti, che si presentano evidentemente separate con valori in sx molto più alti rispetto a quelli in dx.

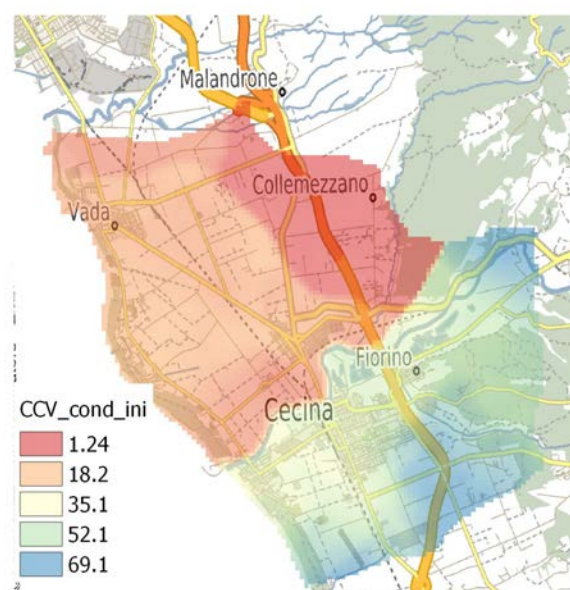


Figura 12: Mappa della conduttività idraulica media derivata dai modelli NIT e PGG.

Si è proceduto così in una nuova zonazione della conducibilità basandosi, da un lato, sui valori misurati e dall'altro sui valori stimati dal db stratigrafico assumendo le seguenti classi di permeabilità:

Tipo strato	m/s	m/g	Descrizione
acquifero	1E-04	1E+01	arenarie sabbie ghiaie
acquitardo	1E-06	1E-01	limi sabbiosi sabbie argillose
acqui cludo	1E-08	1E-03	argille limi

*Tabella 7: conducibilità idrauliche rappresentative dei diversi strati*

X	Y	Zona CCV	Fonte	Località	T mq/s	Ne	Ss
1626988	4799974	SX	ARPAT (2013) su prove Provincia di Pisa (2011)	23A	6,1E-02		
1627084	4799995	SX	ARPAT (2013) su prove Provincia di Pisa (2011)	piezometroA SA	6,5E-02		
1627087	4799986	SX	ARPAT (2013) su prove Provincia di Pisa (2011)	steccaia2	7,3E-02		
1626747	4799743	SX	ARPAT (2013) su prove Provincia di Pisa (2011)	steccaia1	8,5E-02	1,00E-01	
1624829	4796977	SX	Regione Toscana (2006)	CD1	1,20E-02		
1624769	4796908	SX	Regione Toscana (2006)	CD2	7,80E-03		
1624438	4797277	SX	ASA	LADR	1,00E-02		
1623912	4796640	SX	ASA	Fattoria Ladronaia	1,00E-02		
1625328	4796198	SX	Ruffini (2005)	Paratino ASA	3,00E-03		
1627132	4800188	SX	ARPAT (2013) su prove Provincia di Pisa (2011)	24A	9,90E-02	1,40E-01	
1620191	4801914	dx	ARPAT(2003)	santa rosa	2,00E-03		2,00E-04
1620605	4800530	dx	ARPAT(2003)	belvedere	3,00E-03		5,00E-07
1621610	4799240	dx	Fiaschi & Murratzu (2001)	palazzi	1,00E-01		5,00E-05

*Tabella 8: Parametri idrogeologici da prove*

Nella figura seguente è riportata la distribuzione spaziale interpolata della conduttività media. I valori più alti si realizzano in corrispondenza dell'area della Steccaia, in accordo con le misure. La distribuzione sembra confermare anche i valori tendenzialmente più bassi, già ottenuti in calibrazione, per il terrazzo antico di Collemezzano.

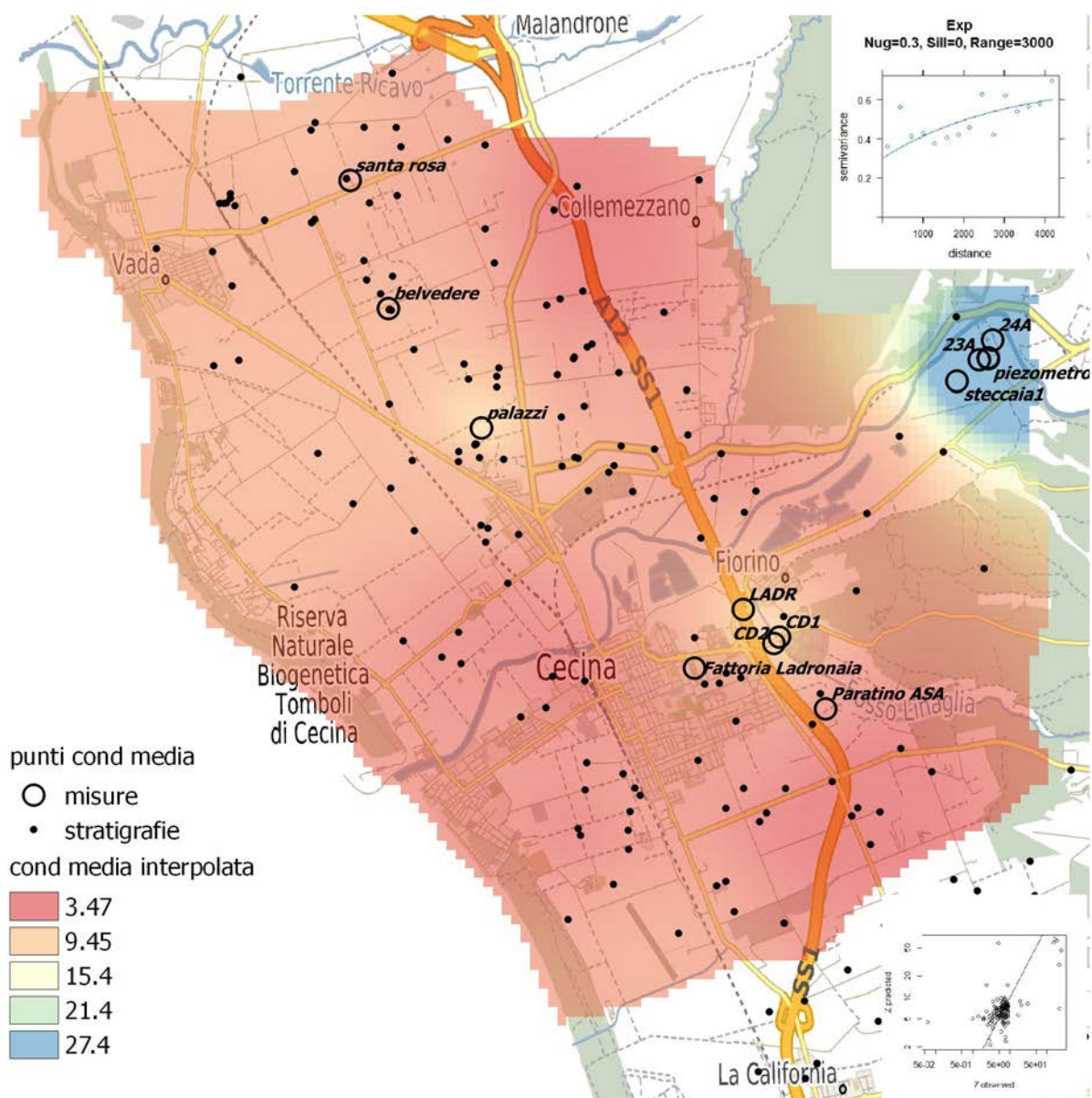


Figura 13: Mappa della conduttività idraulica media interpolata

Per quanto riguarda la storatività sono stati assunti per l'intero acquifero i valori medi ricavati dalle prove prima viste e, dunque, una porosità efficace di 0,12 ed un coefficiente di immagazzinamento specifico di  $1e-4$ .

I relativi range possono essere assunti tra 0,05 e 0,2 per la porosità efficace e tra  $1e-4$  ed  $1e-7$  per  $S_y$ .

## Forzanti idrologiche e condizioni al contorno

Le elaborazioni condotte sulle serie storiche di forzanti idrologiche e carichi risultanti nei due sistemi acquiferi confermano la scelta, già impiegata nei modelli originari, di utilizzare stress periods di durata trimestrale.

Considerato infatti che la modellazione di MODFLOW non contempla il flusso nel mezzo insaturo, l'applicazione della ricarica è assunta come immediata all'interno dello stress period dal momento che la durata di quest'ultimo sarà, in ogni caso, superiore al tempo di ritardo.

Si è proceduto così nell'aggregazione delle diverse variabili fin qui descritte e acquisite, su base trimestrale stagionale di 13 annualità (2005 – 2017), per un totale di 52 stress periods e, in seguito, nella determinazione di valori medi annui del periodo,

Si è trattato originariamente di:

- Forzanti idrologiche
  - ricarica;
  - quote idrometriche;
- Condizioni al contorno
  - prelievi concentrati da pozzi
    - idropotabili
    - industriali
    - altri

Ulteriori condizioni al contorno date da limiti a flusso imposto laterali sono stati ottenuti dagli stessi aggregati trimestrali della ricarica utilizzando formulazioni di ragguaglio areale per i bacini rappresentati.

## Ricarica

La forzante idrologica della ricarica verticale è stata derivata dalle precipitazioni sfruttando relazioni tra pioggia e ricarica ottenute da precedenti modellazioni idrologiche di bacino con i codici SWAT e MOBIDIC.

L'analisi incrociata degli output dei due diversi “motori” idrologici ha messo in evidenza alcune criticità, già evidenziate in precedenti rapporti realizzati da ARPAT (2014).

L'elemento critico maturato nel precedente contributo riguarda il corretto utilizzo dei termini di bilancio “Infiltrazione” e “Percolazione” del modello MOBIDIC. A giudicare dalla figura sotto riportata, infatti, il termine “Percolazione” sembrerebbe concettualmente il più idoneo a rappresentare la ricarica sotterranea e costituzione del deflusso di base, ma un confronto dei risultati mostra con altrettanta evidenza come il termine “Percolazione” sia molto distante dalle usuali stime (i.e. 177 mm/anno è una media di varie stime della ricarica contenuta in ARPAT (2003) per la pianura in dx, pari a 5 E-4 m(g) mentre decisamente più prossimo appare il termine infiltrazione.

### Confronto infiltrazione - percolazione modello MOBIDIC

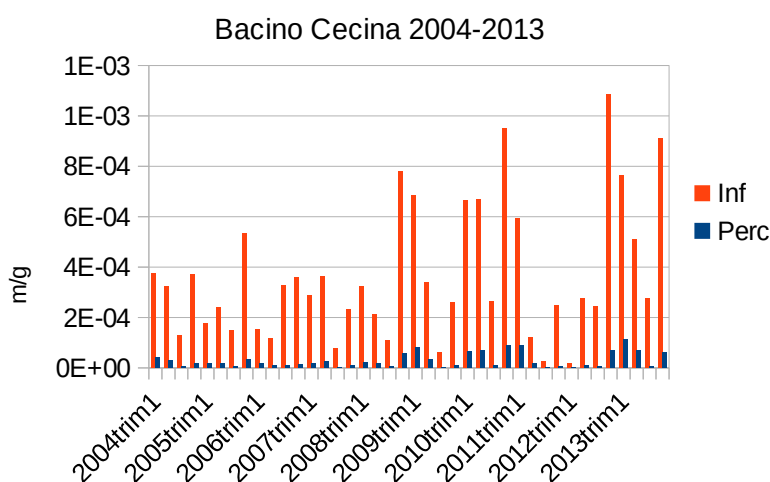


Figura 14: Confronto tra l'infiltrazione e la percolazione del modello MOBIDIC

Il motivo, maturato anche a seguito di una discussione con gli sviluppatori del MOBIDIC, sembra dovuto ad un prevalente impiego del deflusso ipodermico alimentato dall'infiltrazione per la costituzione della curva di esaurimento dell'idrogramma, il quale, pur calibrandosi efficacemente, andrebbe ad occupare ambiti in realtà propri del deflusso di base (Fig. 15). Occorre ricordare, tra l'altro, che il modello MOBIDIC nasce come modello per la previsione delle piene, in contesti pertanto dove ha poco o per nulla influenza il deflusso di base.



Figura 15: Schema concettuale del Modello MOBIDIC

La scelta suggerita dagli stessi modellisti di MOBIDIC è stata dunque quella di utilizzare come stima del termine di ricarica dei sistemi acquiferi il termine di infiltrazione in luogo della percolazione.

Per la bassa pianura di Cecina dove il modello PGG aveva già sviluppato un congruo periodo di modellazione in transitorio con conseguenti serie temporali delle ricariche è stata ricercata una regressione tra le ricariche trimestrali impiegate nel modello PGG e le precipitazioni cumulate trimestrali del pluviometro di Cecina (Fig. 16).

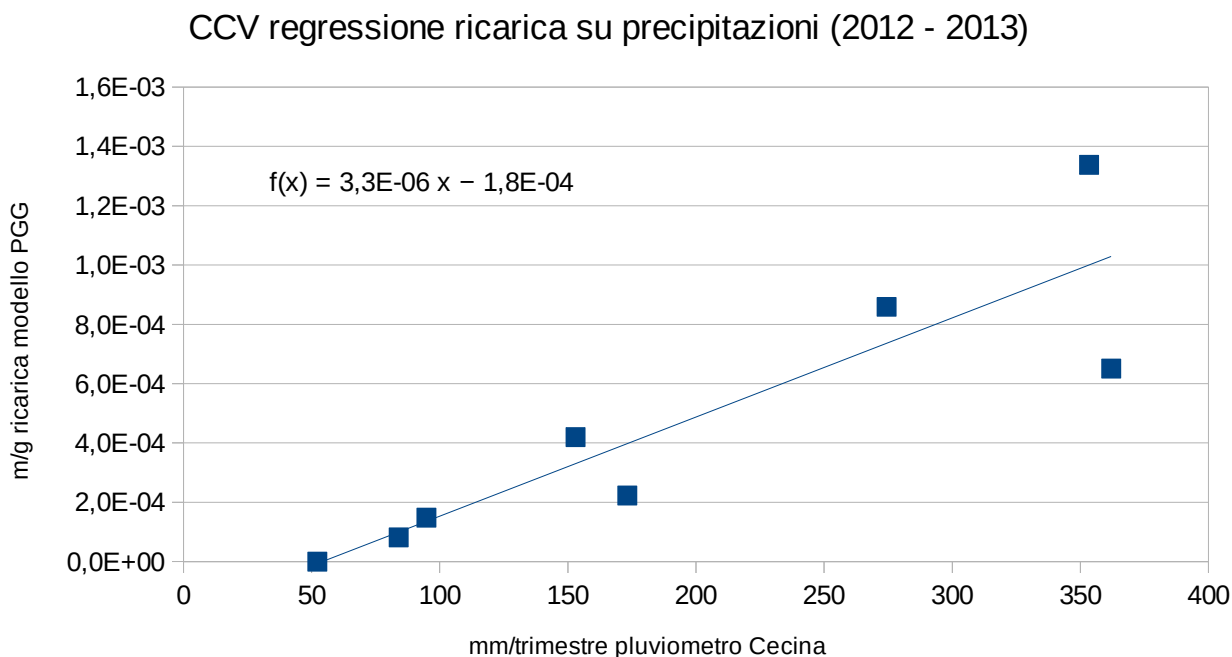


Figura 16: Regressione ricarica del modello PGG sulle cumulate trimestrali al pluviometro di Cecina

Applicando la formula della regressione agli anni successivi al 2013, termine del modello PGG, si è ottenuta la serie temporale della ricarica 2005-2017 così rappresentata nei suoi valori medi annui e trimestrali (Fig. 17). La media annua di 138 mm è in linea con i valori attesi per questa variabile (vv. sopra).

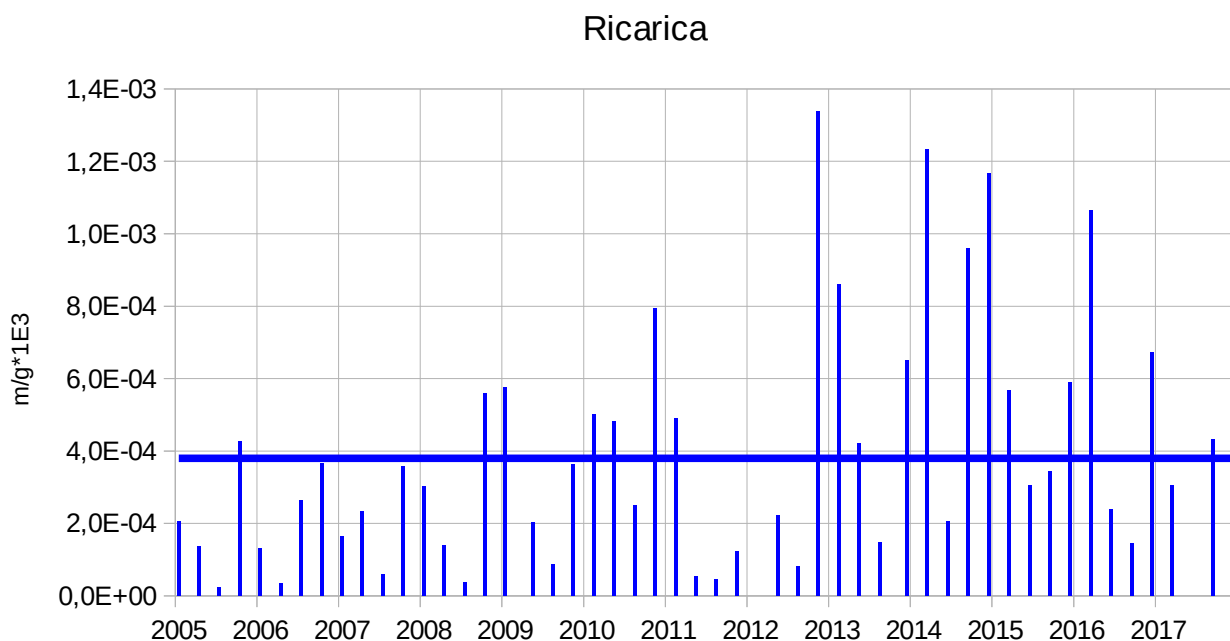


Figura 17: Serie temporale aggregati trimestrali e media annua ( $0,38 \text{ mm/g} \Rightarrow 138 \text{ mm/anno}$ )

Un confronto dei termini di ricarica ottenuti con i valori medi di infiltrazione prodotti dal modello MOBIDIC sull'estensione del modello CCV mostra, infine, nel complesso, una buona corrispondenza (Fig. 18).

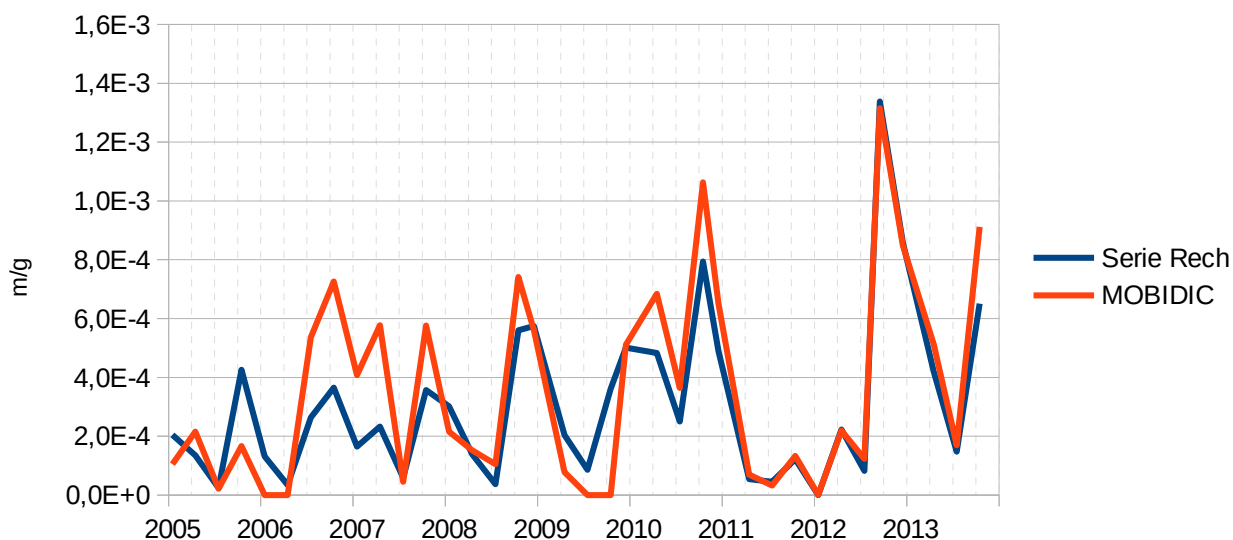


Figura 18: Confronto tra serie ricostruita e modello MOBIDIC

## Quote idrometriche

Le quote idrometriche governano la condizione river e sono direttamente registrate, ove disponibili, dagli strumenti del Servizio Idrologico.

Per l'estensione 2013-2017 del modello CCV della bassa Val di Cecina sono risultate disponibili quote idrometriche misurate. La serie temporale complessiva degli aggregati trimestrali è rappresentata nella seguente figura.

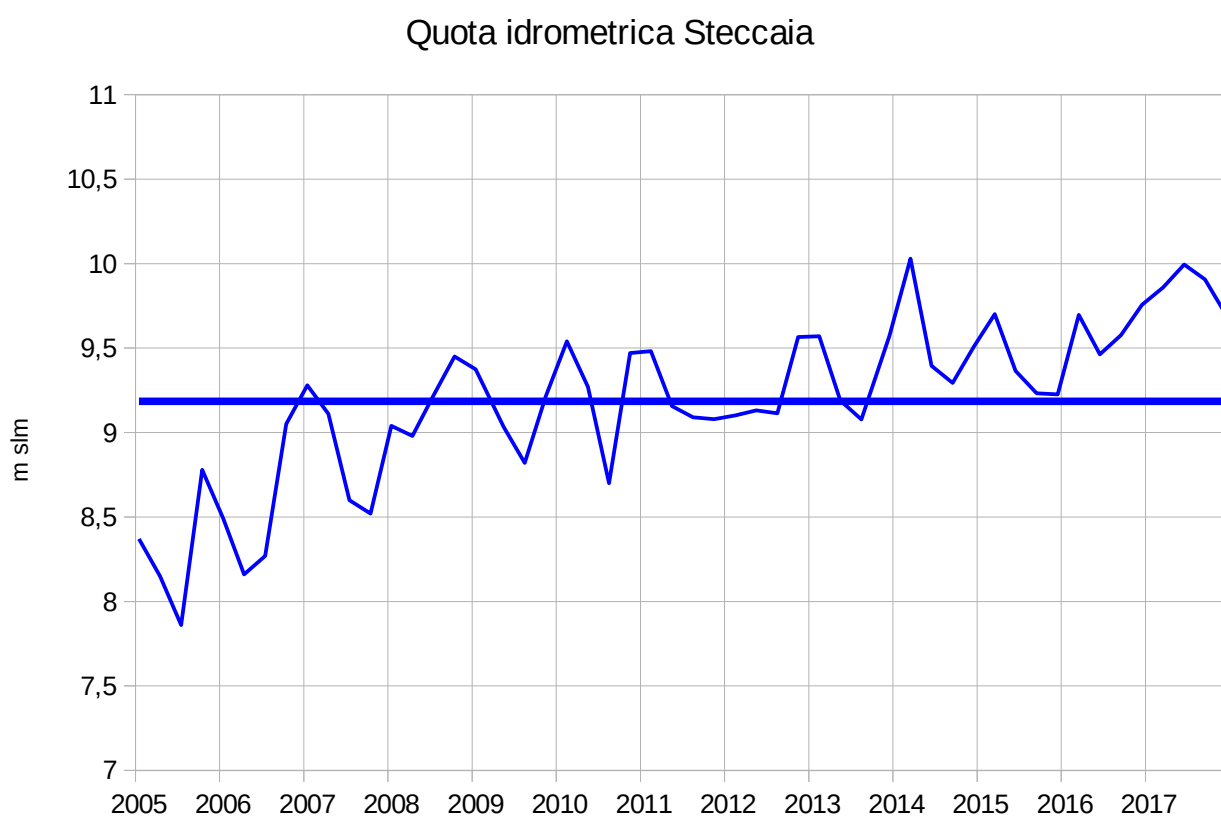


Figura 19: CCV serie temporale aggregati trimestrali e media annua (9,18 m s.l.m.)

## Prelievi

I prelievi sono stati distinti in prelievi concentrati, relativi alle maggiori utenze idropotabili ed industriali e prelievi diffusi relativi all'uso agricolo e domestico della risorsa.

I prelievi concentrati riportati in figura 20 sono stati forniti al modello come file georeferenziati ricostruendo, ove possibile, anche la serie cronologica.

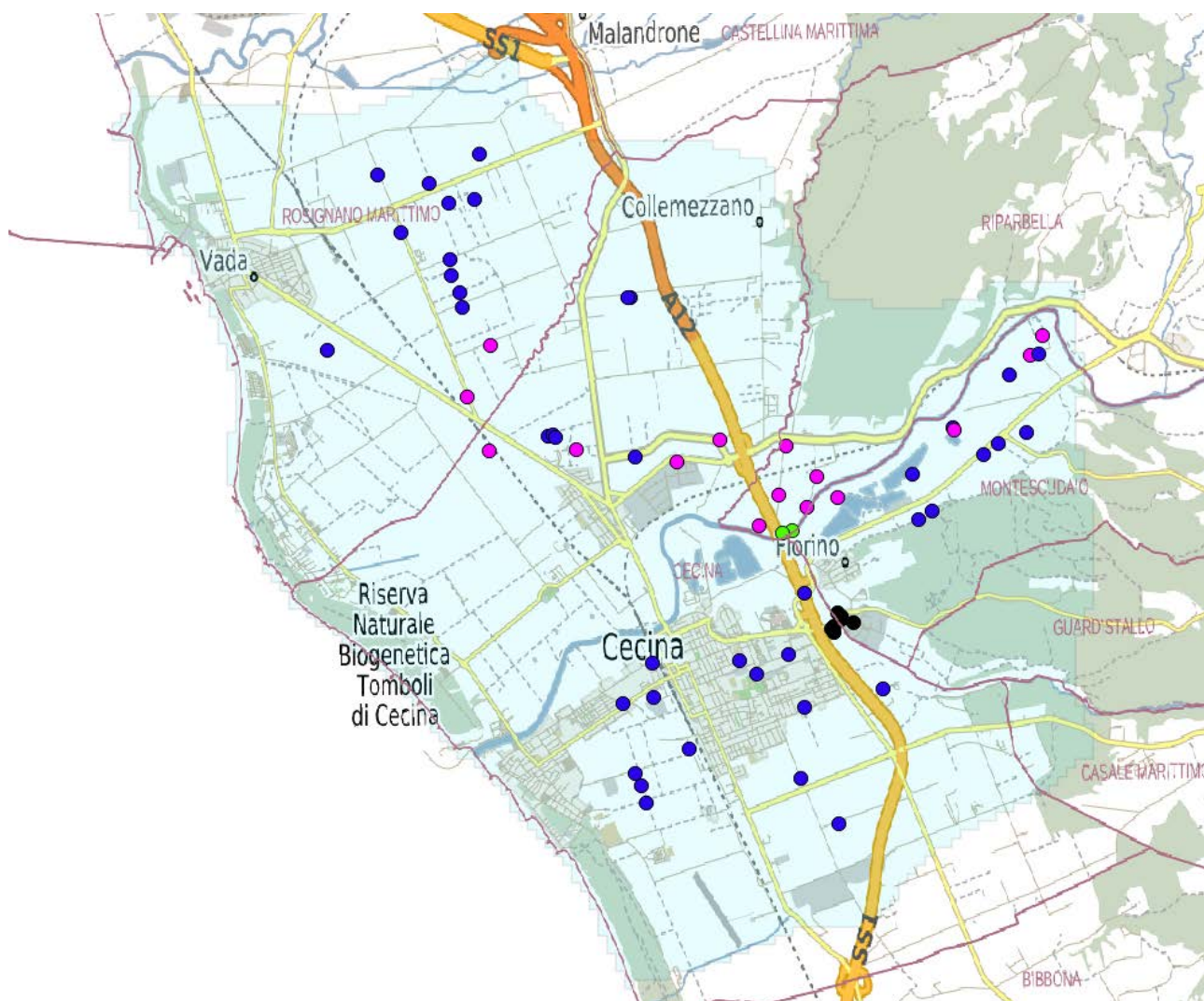


Figura 20: Prelievi concentrati nel sistema acquifero CCV

I prelievi concentrati più rilevanti dopo l'idropotabile sono rappresentati dai prelievi industriali della Società Solvay. I volumi annui sono stati ottenuti dagli uffici ex provinciali del demanio idrico di RT.

I prelievi diffusi sono stati invece valutati separatamente come ricarica negativa sulla base di stime relative all'entità dei fabbisogni domestici ed irrigui.

Per quanto riguarda il prelievo domestico assumendo cautelativamente un prelievo di 1 mc/g (consumo di una famiglia di 5 persone) per pozzo, una stima condotta per l'acquifero in dx della bassa Val di Cecina, su di un'area di 28 Km<sup>2</sup> dove si contano 234 pozzi, è risultata nell'ordine dei 3 mm/anno (8E-6 m/g), valore non rilevante ai fini del bilancio complessivo del sistema.

Più consistente appare invece il consumo agricolo, soprattutto per la pianura in dx del Fiume Cecina del modello di valle. La stima condotta per il precedente modello NIT (ARPAT, 2003) riportava un volume di 3,2 Mmc, corrispondente ad un'altezza di prelievo ben più consistente di 67 mm/anno.

Considerato che i prelievi irrigui si concentrano di norma nel terzo stress period (luglio-agosto-settembre) l'altezza di prelievo irriguo è stata sottratta alle altezze di ricarica relative agli stress period estivi.

#### Prelievi concentrati idropotabili

Il Gestore ASA ha fornito complessivamente i volumi annuali di prelievo aggiornati al 31/12/2017. I dati sono stati verificati e ricondotti ad un'unica forma tabellare e successivamente aggregati su base trimestrale (tabella 9).

In alcuni casi risultando indisponibile il dato mensile, è stata analizzata la distribuzione stagionale mensile del triennio 2004-2006 ed ottenute le seguenti percentuali medie di variazione annua (Fig. 21).

Trimestre		% anno
invernale	Gen-mar	22,1%
primaverile	Apr-giu	25,8%
estivo	Lug-set	30,4%
autunnale	Ott-dic	21,7%

*Tabella 9: Variazione stagionale prelievi potabili*

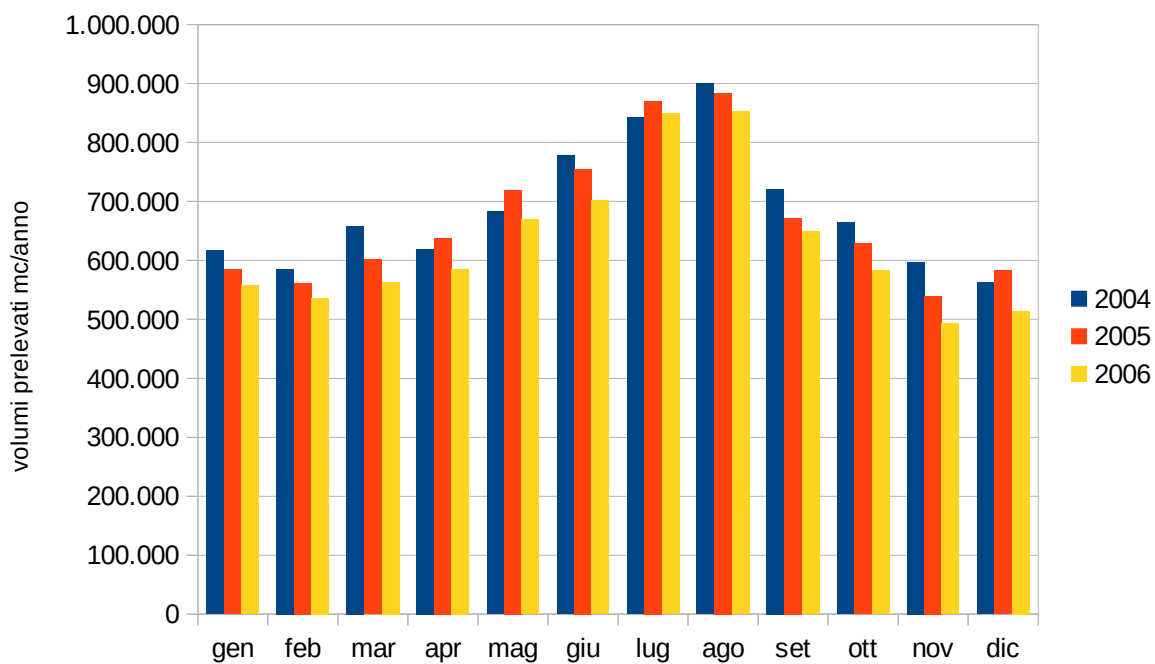


Figura 21: Variazione stagionale dei prelievi ad uso potabile in area Toscana Costa

Le serie temporali mostrano in generale un incremento nei periodi estivi in virtù della forte vocazione turistica dell'area costiera (Figg. 22 ÷ 25).

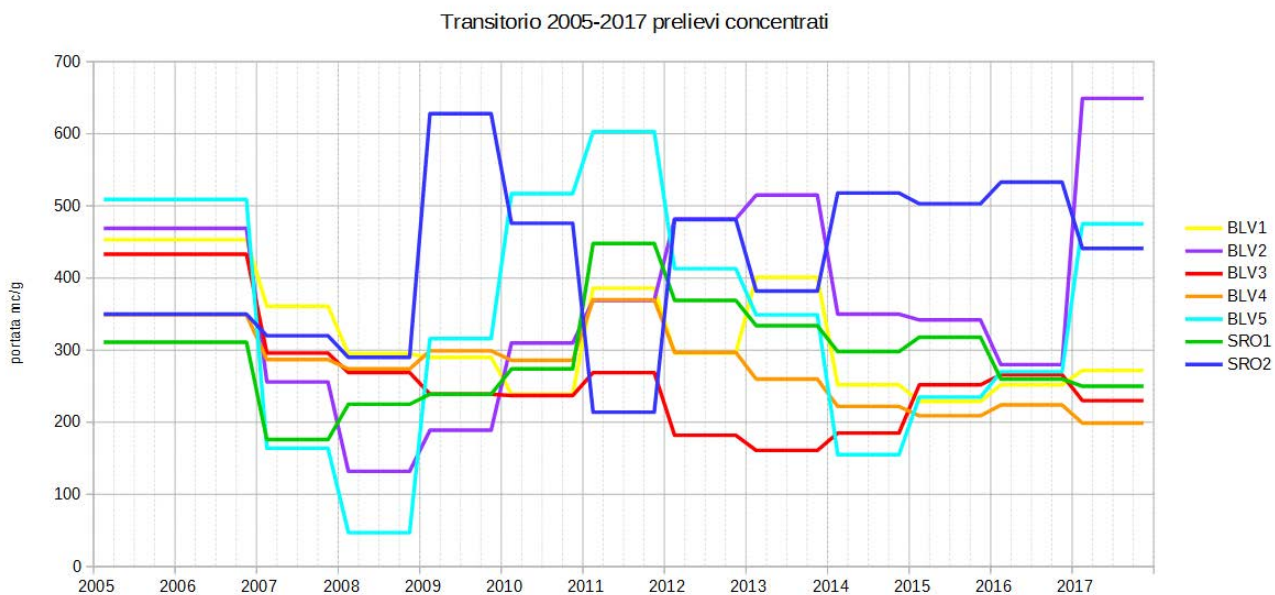


Figura 22 CCV Prelievi ASA – area dx - Rosignano

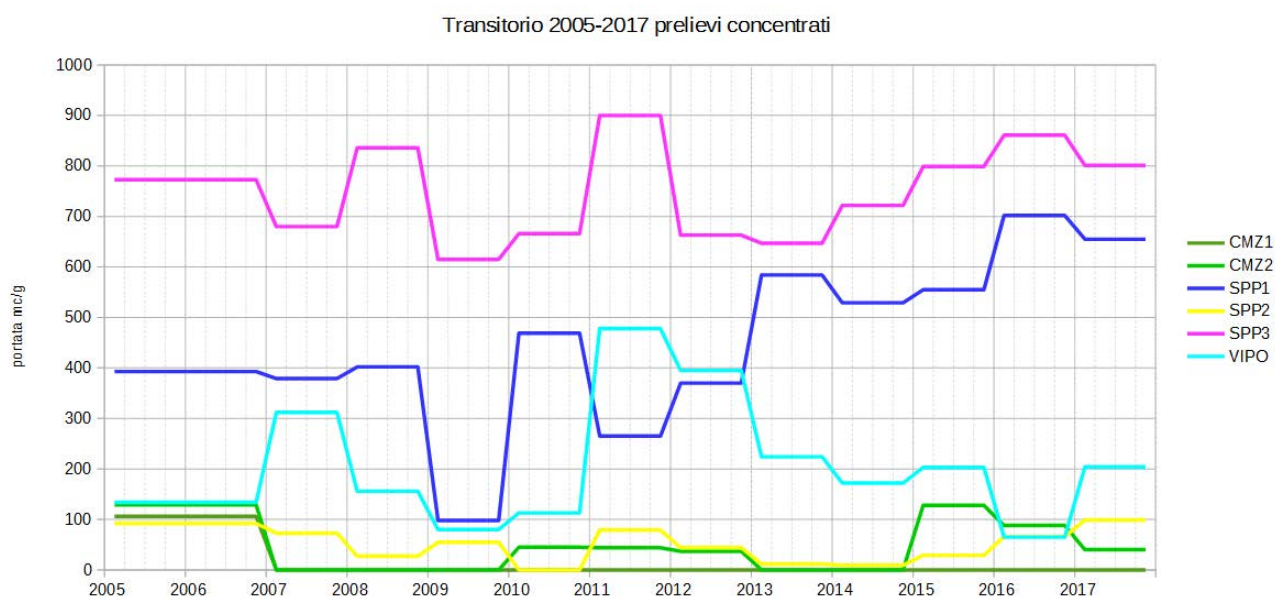


Figura 23 : CCV Prelievi ASA - area dx - Cecina

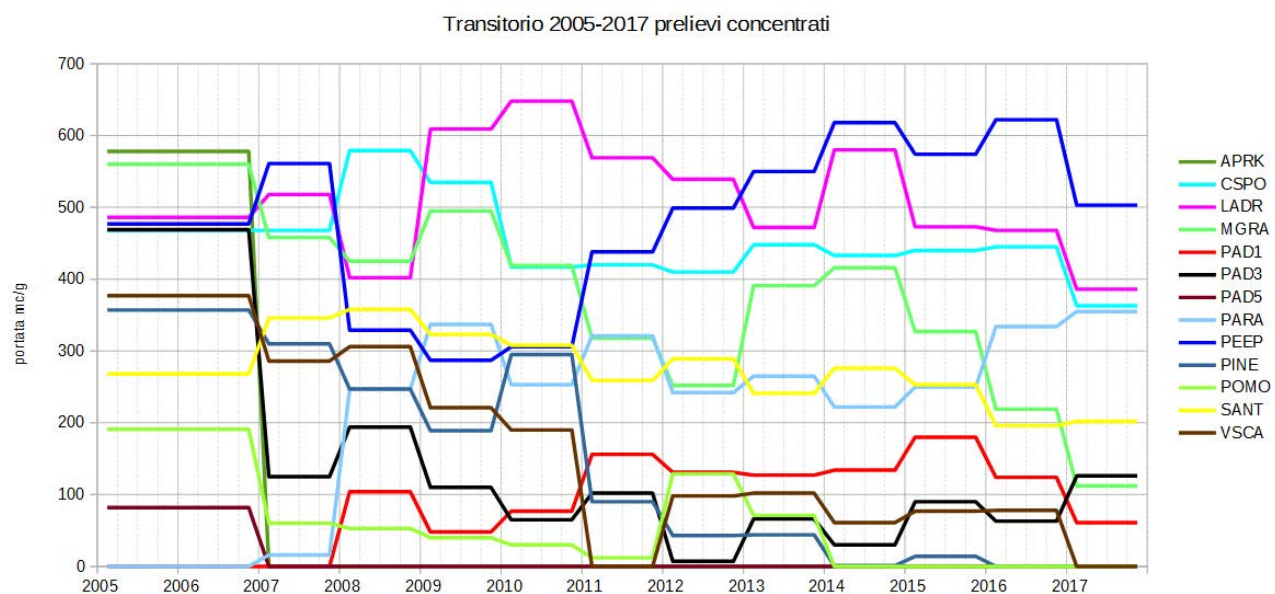


Figura 24: CCV Prelievi ASA – area sx - Cecina

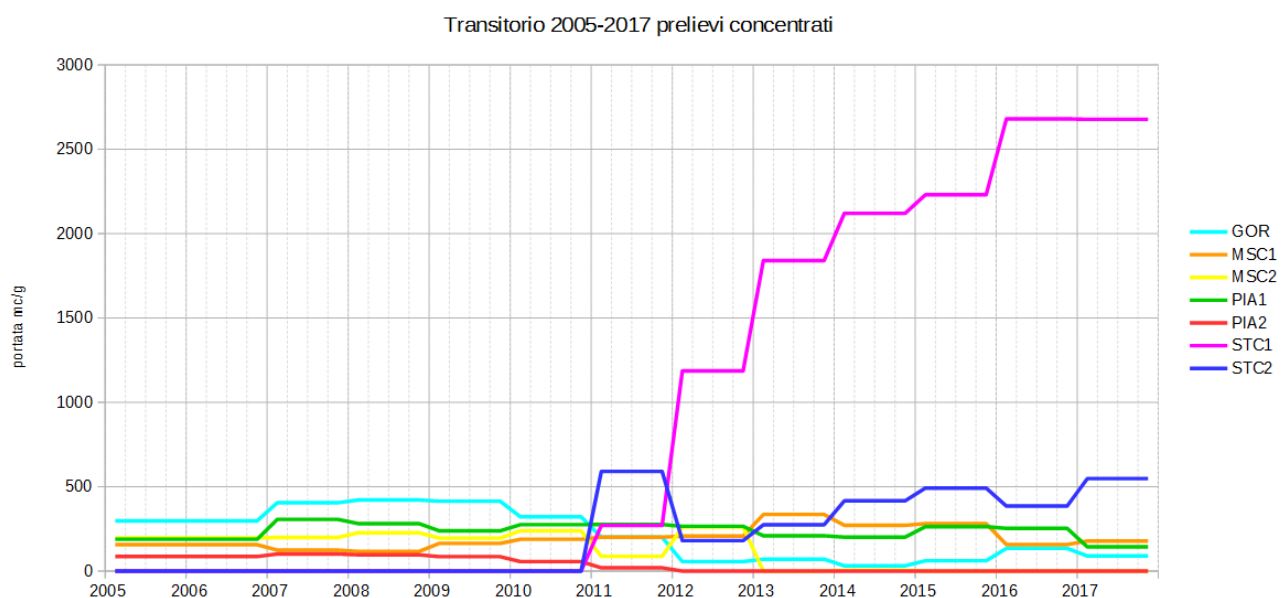


Figura 25: CCV Prelievi ASA - area sx - Montescudaio

### Prelievi concentrati industriali

I dati sui prelievi industriali sono stati forniti dagli Uffici del genio Civile ex Provincia e ritenuti sufficientemente omogenei su base annua (Figg. 26 ÷ 29) .

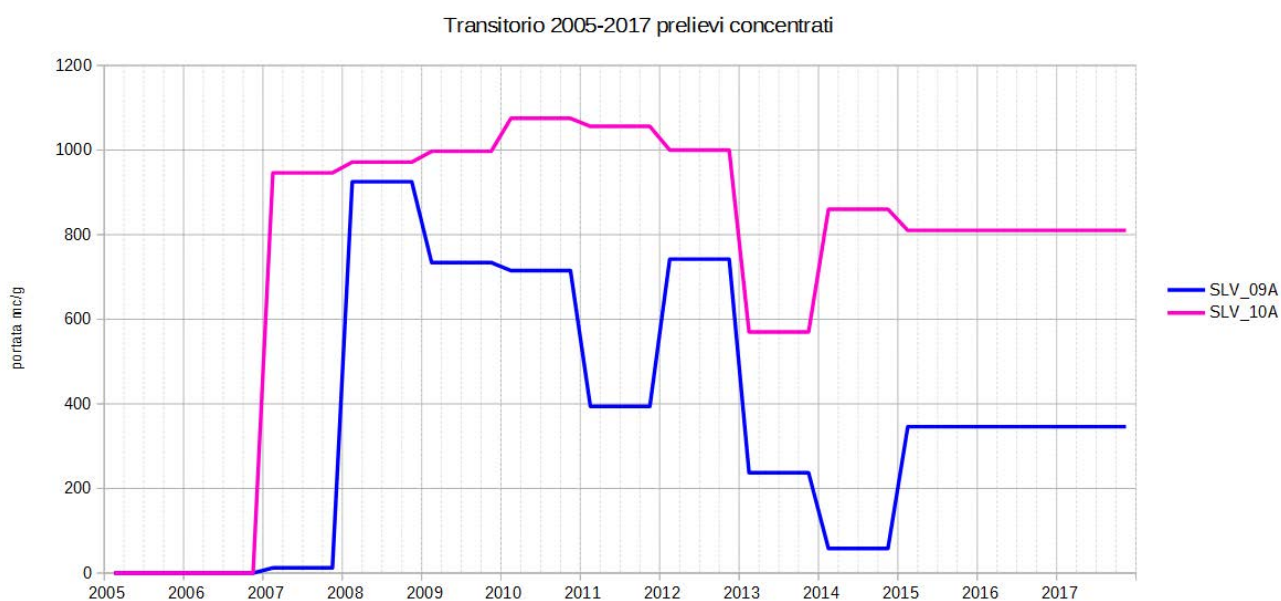


Figura 26: Prelievi Industriali - area dx - Rosignano

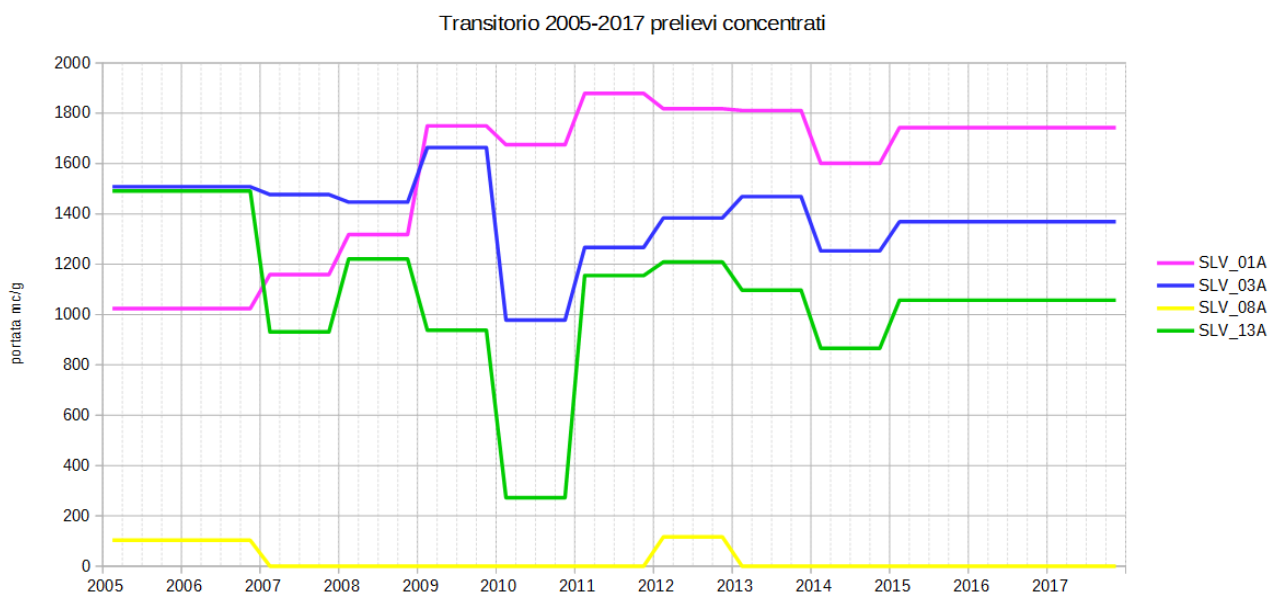


Figura 27: CCV Prelievi Industriali - area dx - Cecina

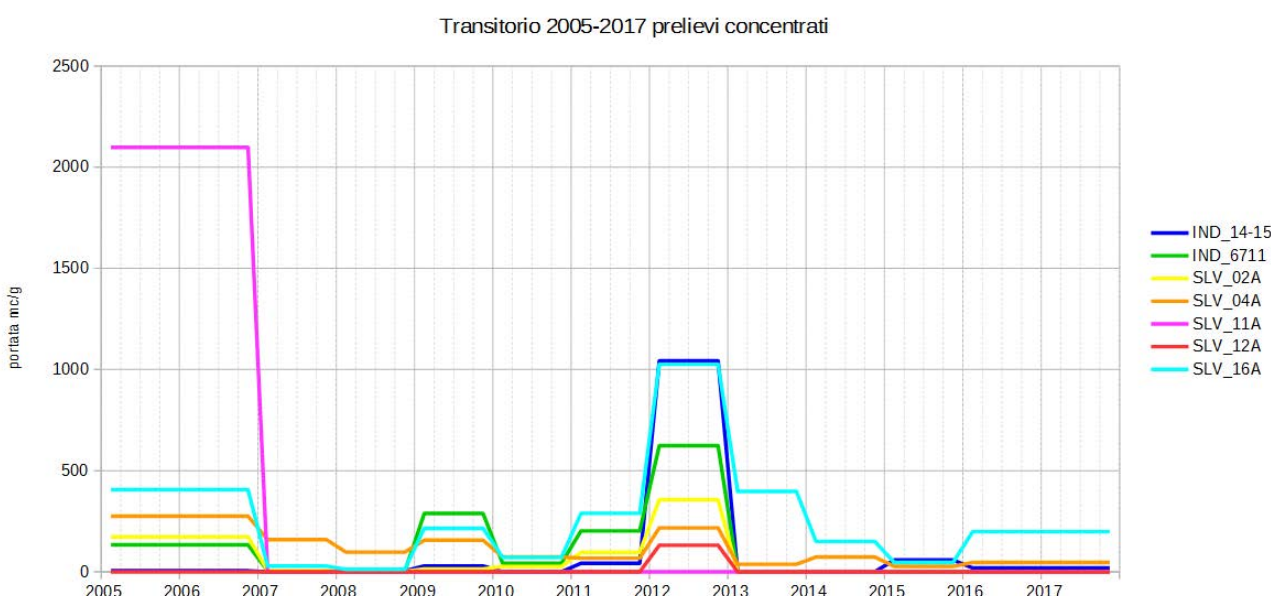


Figura 28: CCV Prelievi Industriali - area dx - Acquarta

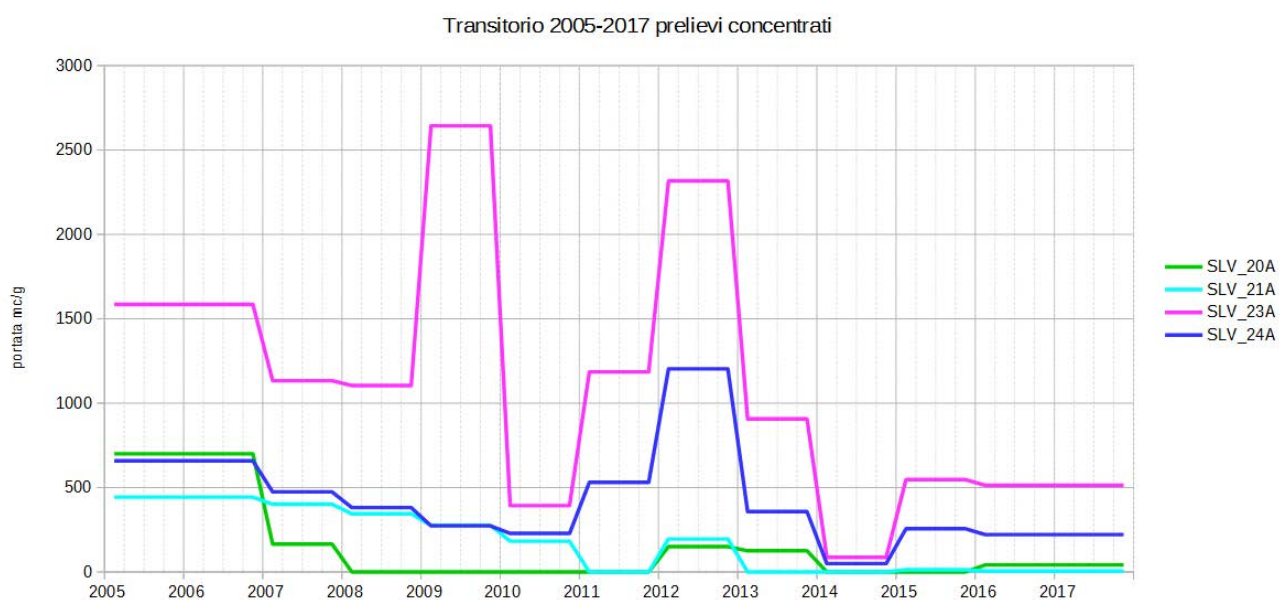


Figura 29: CCV Prelievi Industriali - area sx - Montescudaio

### Prelievi concentrati barriera idraulica Poggio Gagliardo

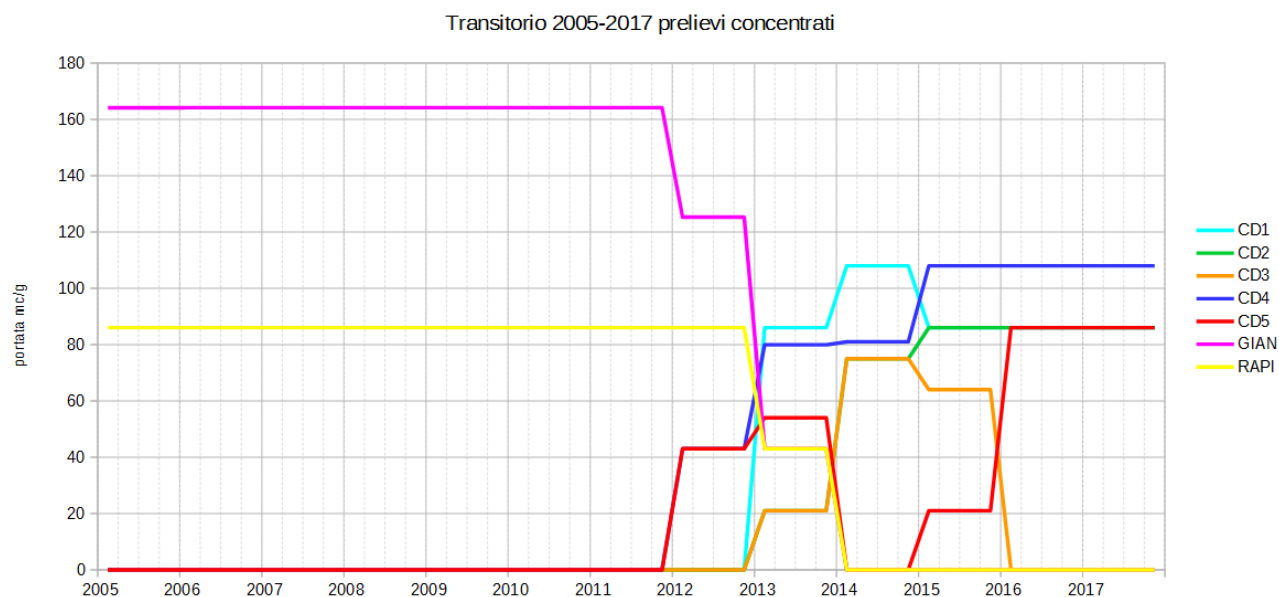


Figura 30: CCV Prelievi barriera idraulica Poggio Gagliardo

### **Altre condizioni a flusso imposto**

Le condizioni a flusso imposto indicate dal modello concettuale corrispondono ai limiti dei rilievi collinari. Risultando diverse le estensioni, il contributo è stato calcolato separatamente in dx e sx:

Contributo	ncelle	area_mq	rch_m_g	Qcella mc_g
colline dx	115	11.769.583	3,8E-04	39
colline sx	52	27.153.632		198

*Tabella 10: CCV Contributi laterali*

## Target di calibrazione

I target di calibrazione sono rappresentati principalmente dalle stazioni automatiche SIR già indicate in precedenza, cui sono state aggiunte, al fine di ottenere una migliore calibrazione, ulteriori stazioni SIR e un insieme pur limitato di registrazioni piezometriche eseguite dalla Regione Toscana dal giugno 2012 al febbraio 2013.

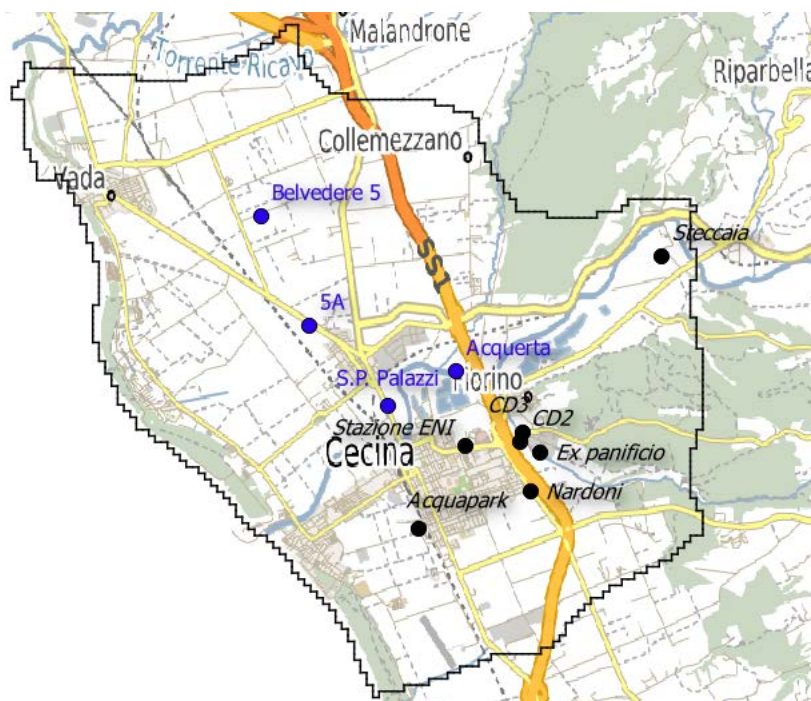


Figura 31: Target transitori (in blu stazioni SIR in nero registrazioni di RT)

Nella seguente tabella sono riportate le principali statistiche delle stazioni SIR:

Area	Stazione		Periodo	N anni monit.	Statistiche aggregati mensili					Qpc	Qpzm0517
					min	max	median	mean	CV	mslm	mslm
CCV	liv TOS19000601	5A	2005-2017	13	-8,6E+00	-4,3E+00	-7,0E+00	-6,9E+00	-1,5E-01	8,41	15,28
	liv TOS19000616	Belvedere 5	2008-2011	4	-1,6E+01	-1,3E+01	-1,5E+01	-1,5E+01	-7,3E-02	18,72	33,24
	liv_TOS19000621	Acquerta	2006-2017	12	-8,8E+00	-1,9E+00	-5,3E+00	-5,3E+00	-2,7E-01	7,58	12,92
	liv_TOS19000622	S.P. Palazzi	2005-2011	7	-3,9E+00	-7,1E-01	-2,3E+00	-2,3E+00	-3,5E-01	7,59	9,87

Tabella 11: Statistiche aggregati mensili target transitori selezionati tra le stazioni SIR

Nei grafici seguenti sono riportati i plot temporali delle stazioni aggiunte:

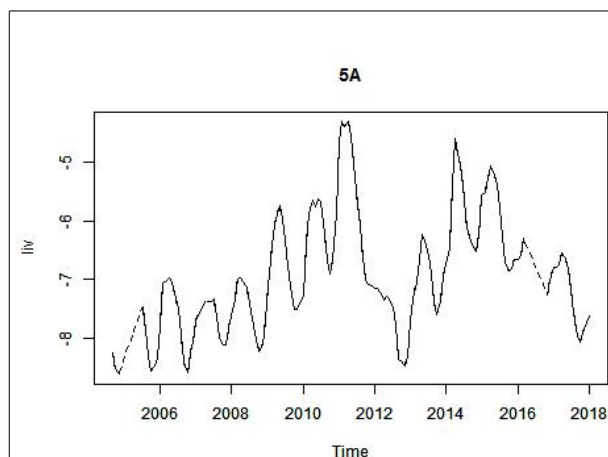


Figura 32: target "5A"

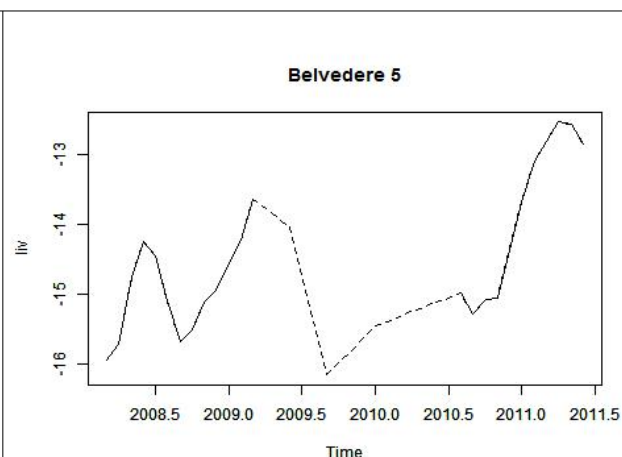


Figura 33: target "Belvedere 5"

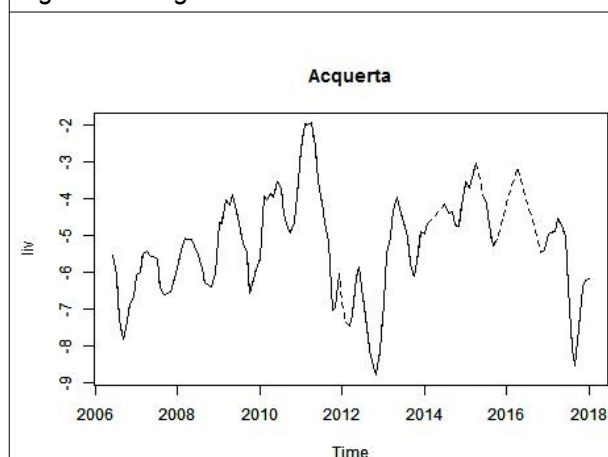


Figura 34: target "Acquerta"

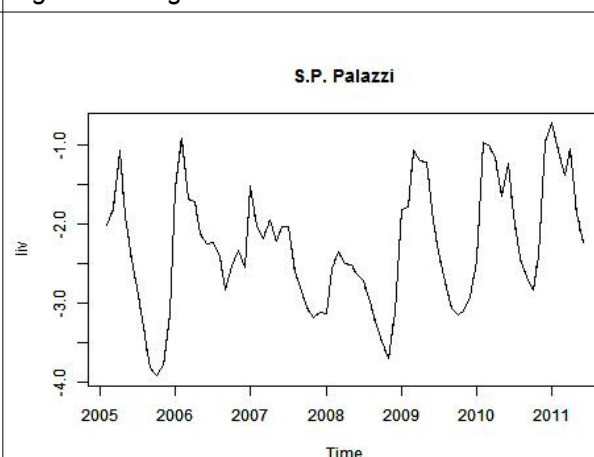


Figura 35: target SP Palazzi

Gli ulteriori dati transitori riguardano un insieme di 7 punti di osservazione tra pozzi e piezometri distribuiti nell'area della modellazione dell'acquifero di Poggio Gagliardo; di seguito sono riportate le principali elaborazioni statistiche:

Piezometro	Da	A	N	Min	Max	Mediana	Media	CV
Acquapark	20/06/2012	15/02/2013	11521	0,38	1,91	1,02	<b>1,15</b>	0,36
CD2	20/06/2012	15/02/2013	11520	0,09	0,87	0,40	<b>0,41</b>	0,32
CD3	20/06/2012	15/02/2013	11522	0,98	1,57	1,17	<b>1,19</b>	0,11
Ex panificio	28/06/2012	15/02/2013	11137	1,56	2,56	2,12	<b>2,14</b>	0,08
Nardoni	17/02/2013	22/03/2013	1611	1,74	2,03	1,86	<b>1,86</b>	0,03
Stazione ENI	28/06/2012	15/02/2013	11141	0,96	1,68	1,43	<b>1,44</b>	0,09
Steccaia	03/10/2012	22/03/2013	8163	6,03	9,70	8,95	<b>8,50</b>	0,12

Tabella 12: Statistiche aggregati mensili target transitori della campagna RT 2012-2013 – m slm

Le stazioni transitorie con i rispettivi valori medi costituiscono inoltre un gruppo distinto di rilevanti target stazionari.

Per il modello stazionario ulteriori misure, scelte come rappresentative, riguardano 91 punti sull'area di interesse e derivano dalle campagne 2006 di morbida (maggio) e magra (novembre) realizzate da ARPAT ed UNIFI nell'ambito del Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale (PRIN) 2003-2006 (ARPAT UNIFI 2008).

Il modello stazionario è stato inizialmente calibrato sulla base di una distribuzione per zone della conducibilità idraulica media dello spessore di acquifero multistrato (Fig. 36). Le zone sono state ricostruite sulla base della carta geologica e dei precedenti studi (ARPAT 2003, 2014), mentre i valori di partenza sono stati calcolati dalla statistica zonale sulla mappa della conduttività media prima ottenuta.

zona	descrizione	Kmed m/g calibrato	Kmed m/g da interpolazione (zonal statistics)		
			media	min	max
1	terrazzi antichi – pleist medio	<b>1,7E+00</b>	6,8E+00	3,1E+00	4,7E+01
2	terrazzi recenti – pleist superiore	<b>1,3E+01</b>	6,6E+00	1,9E+00	2,9E+01
3	depositi post wurmiani	<b>9,6E+01</b>	9,1E+00	3,9E+00	7,6E+01

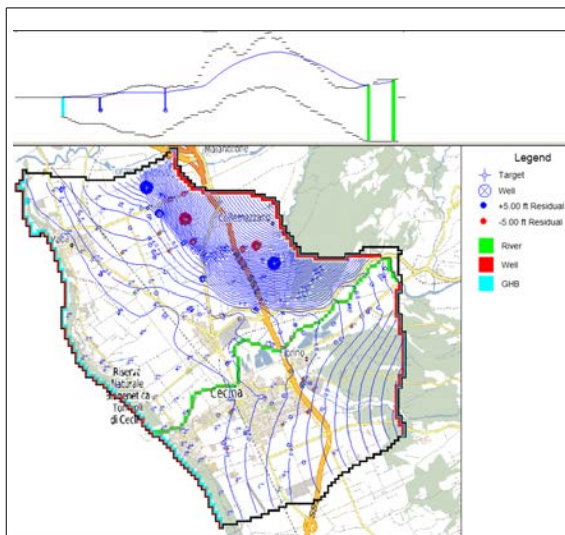
46

Nel complesso la calibrazione del modello stazionario appare soddisfacente con una media dei residui  $< 0,2$  m:

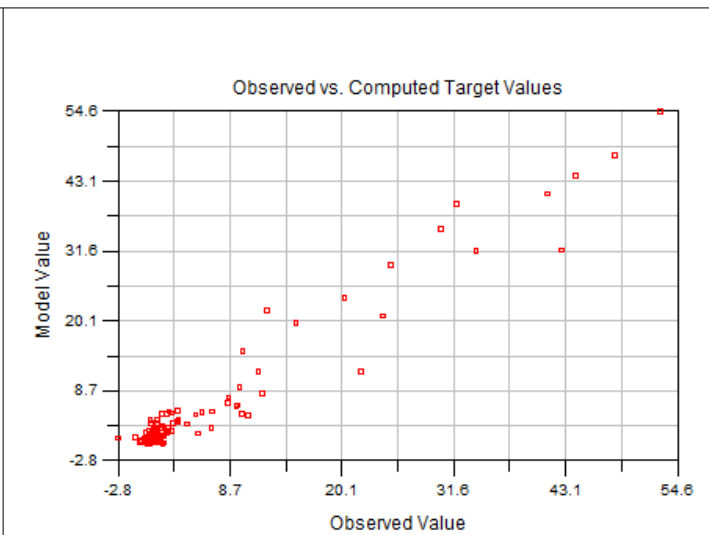
Residual Mean	-0,195844
Absolute Residual Mean	1,709809
Residual Std. Deviation	2,715849
Sum of Squares	741,419282
RMS Error	2,722902
Min. Residual	-9,449957
Max. Residual	10,84367
Number of Observations	100
Range in Observations	55,65
Scaled Residual Std. Deviation	0,048802
Scaled Absolute Residual Mean	0,030724
Scaled RMS Error	0,048929
Scaled Residual Mean	-0,003519

*Tabella 13: CCV\_ST dopo calibrazione iniziale conduttività in tre zone*

La distribuzione spaziale dei maggiori residui si concentra ancora all'interno del terrazzo più antico dove, in tutti i casi, è minore la concentrazione di pozzi e conseguentemente l'informazione idrogeologica.



*Figura 37: CCV\_ST distribuzione spaziale residui*



*Figura 38: CCV\_ST grafico osservato calcolato*

Tuttavia, nel dettaglio, si è osservato come molti dei target più importanti, quali le stazioni SIR e le misure 2012-2013 nell'area di Poggio Gagliardo, mostrassero residui localmente molto alti compresi tra 1 e 3 metri e, pertanto, non accettabili.

È stata così ricercata, tramite il programma PEST, una possibile calibrazione automatica più accurata. La calibrazione con PEST (Doherty *et alii*, 2010) richiede un insieme di “pilot points” dove i valori della conduttività sono noti e/o forniti al modello in un definito range.

Nel nostro caso sono stati forniti, direttamente, come pilot point (Fig. 39), i valori della conduttività in corrispondenza dei punti di prova con un range ristretto, di metà di un ordine di grandezza (5). Per i numerosi punti di stima della conduttività derivati dalle stratigrafie è stato, invece, assunto un range di variazione più esteso e pari ad un ordine di grandezza (10).

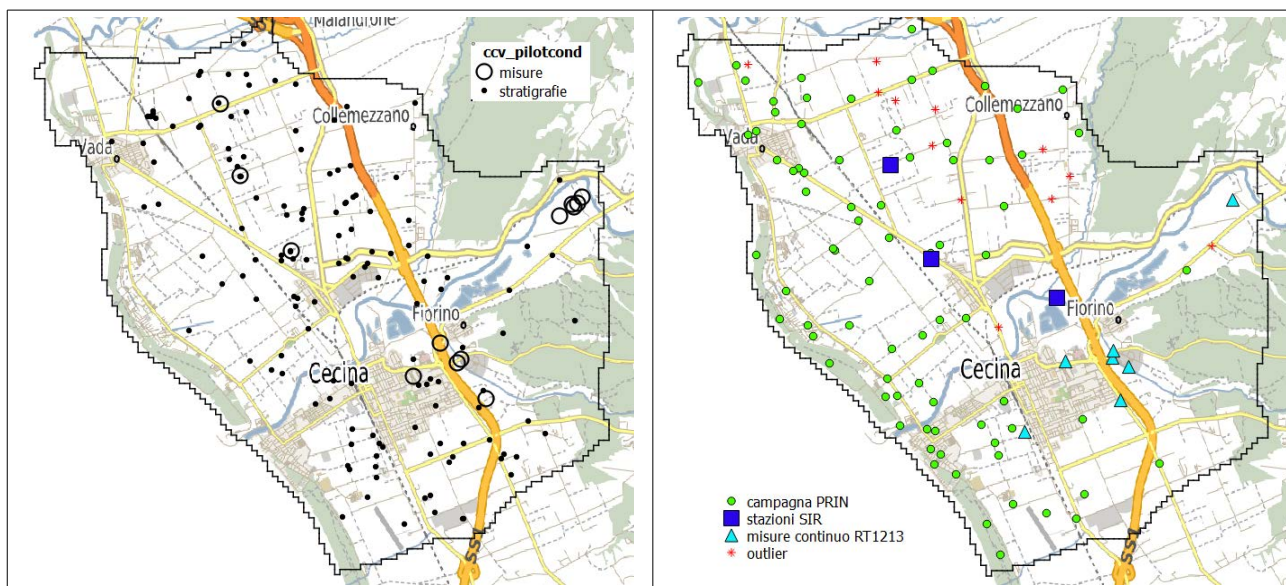
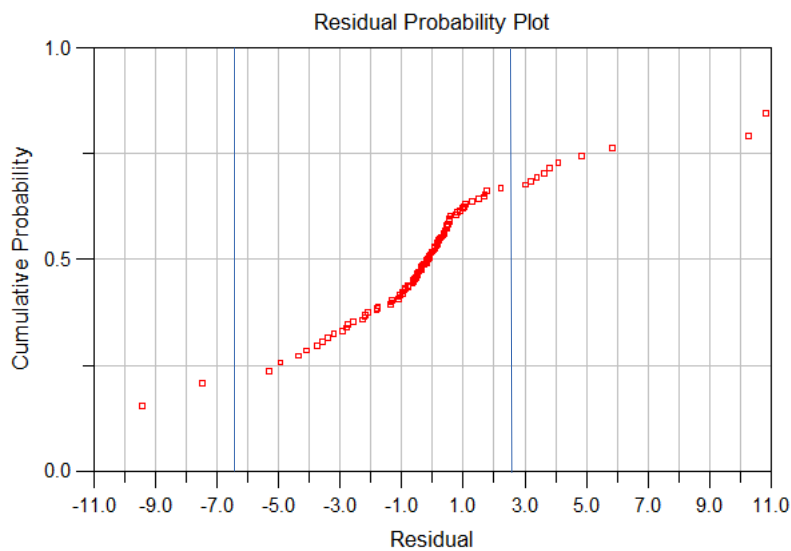


Figura 39: Calibrazione con PEST. Pilot points.

Con la calibrazione automatica di PEST è importante selezionare accuratamente i target, o meglio, attribuirgli una precisa “gerarchia”, dal momento che l’algoritmo può essere in grado di “guidare” comunque la soluzione, variando secondo necessità le conduttività dei pilot points, anche su target meno rappresentativi (outlier) o altrimenti bloccarsi, in presenza di valori prossimi disomogenei (corretti ed outlier).

In particolare sono stati identificati come possibili outlier e attribuiti con un peso basso (0,1) tutti quei target che oltre a mostrare i residui più elevati, si presentavano in qualche modo separati dalla distribuzione nella curva di frequenza cumulata ( $< -6$  e  $> 2.5$ ), (Fig. 40).



*Figura 40: CCV Grafico di frequenza cumulata in scala di probabilità normale dei residui*

Sono stati così stabiliti i seguenti 4 gruppi:

Gruppo	Tipologia	Peso
1	Stazioni SIR	1
2	Piezometri RT1213	1
3	Misure campagna PRIN 2009	0,5
4	Possibili outlier influenzati da effetti locali	0,1

*Tabella 14: Suddivisione dei target in gruppi.*

Il risultato della calibrazione automatica della conduttività con PEST riportato nella figura seguente, se confrontato con la mappa della conduttività interpolata da misure e stime, conferma la presenza di aree maggiormente conduttive in corrispondenza dell'area della Steccaia. Ulteriori aree di alta conduttività sono indicate in prossimità della costa ed al limite sud del modello.

Si riconosce ancora la presenza di aree con conduttività più ridotta in corrispondenza del terrazzo di Collemezzano.

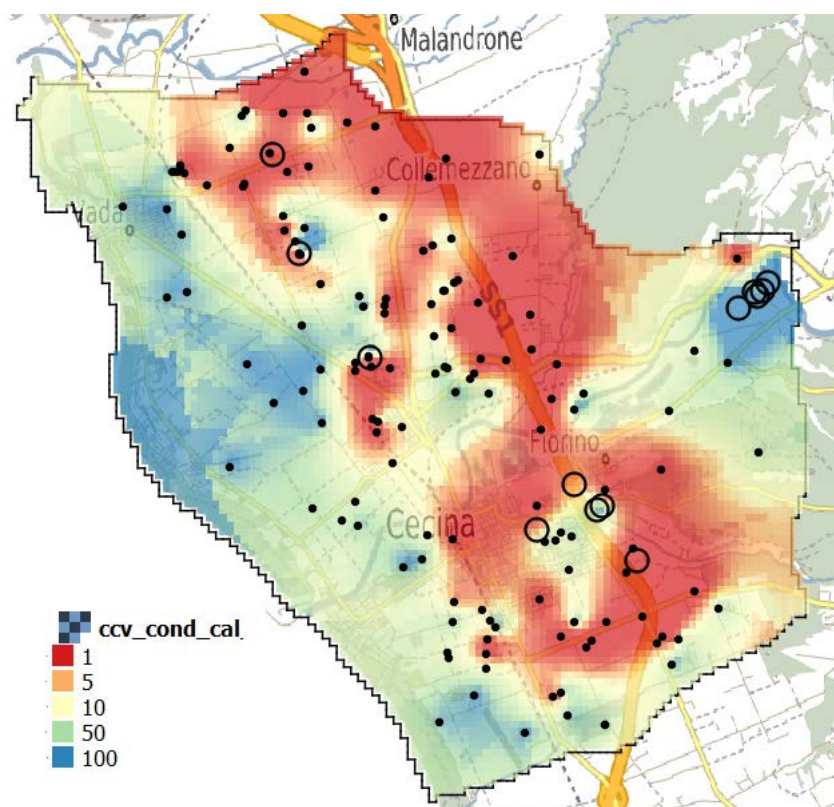


Figura 41: mappa della conduttività media calibrata con PEST

I miglioramenti con la calibrazione in continuo di PEST sono evidenti: la media dei residui si abbassa di quasi 20 volte e la somma dei quadrati di 3 volte, diminuisce notevolmente la dispersione del diagramma osservato-calcolato, ma soprattutto si riducono notevolmente i residui dai target privilegiati delle stazioni con misure in transitorio (Tab.15, Figg. 42 ÷ 44).

Residual Mean	<b>0,081383</b>
Absolute Residual Mean	<b>0,911651</b>
Residual Std. Deviation	1,576421
Sum of Squares	<b>249,172772</b>
RMS Error	1,578521
Min. Residual	-6,883659
Max. Residual	7,180581
Number of Observations	100
Range in Observations	55,65
Scaled Residual Std. Deviation	0,028327
Scaled Absolute Residual Mean	0,016382
Scaled RMS Error	0,028365
Scaled Residual Mean	0,001462

Tabella 15: Statistica residui CCV\_ST dopo calibrazione K con PEST (pilot points),

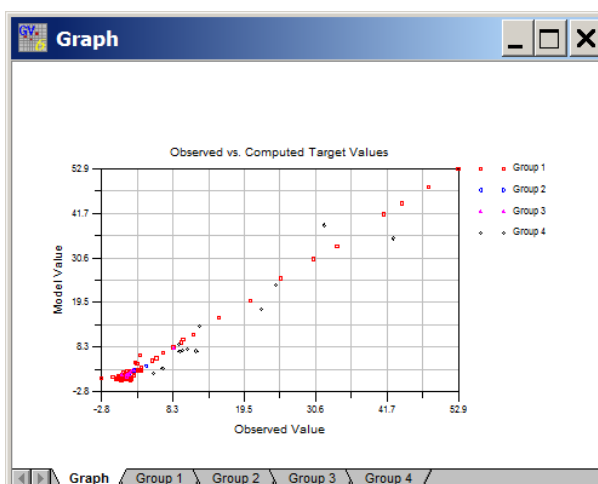


Figura 42: Osservato calcolato CCV\_ST dopo calibrazione K con PEST (pilot points)

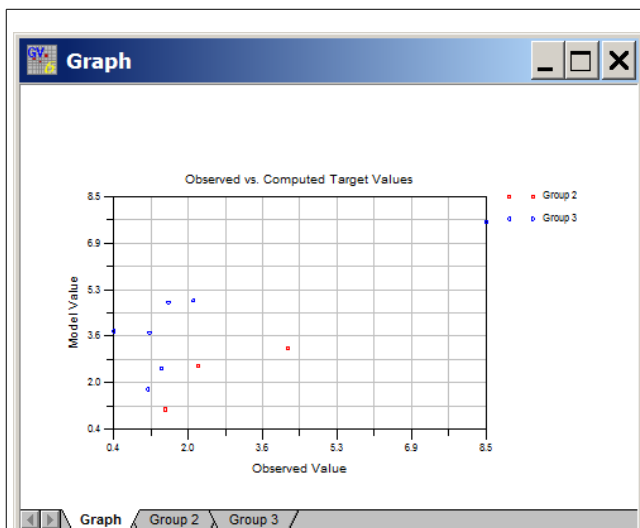


Figura 43: Osservato calcolato CCV\_ST prima calibrazione con PEST

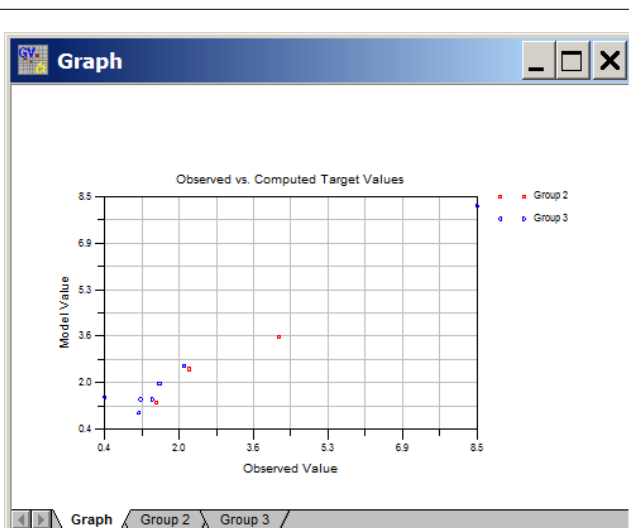


Figura 44: Osservato calcolato CCV\_ST dopo calibrazione con PEST

La superficie piezometrica ricostruita (Fig. 45) si mostra più articolata e si individuano con evidenza le aree di maggior depressione piezometrica dovute ai prelievi nell'abitato di Cecina, lungo la pianura alluvionale in sx, e sulla pianura in dx tra S. Pietro in Palazzi e dei campi pozzi Belvedere e Santa Rosa.

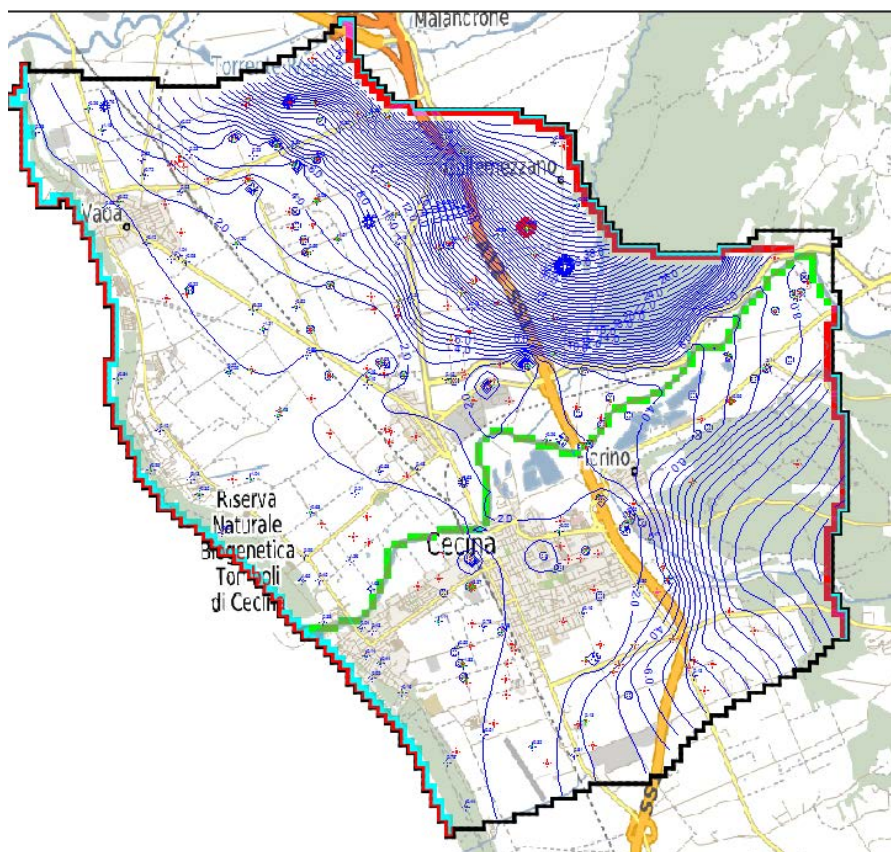


Figura 45: CCV\_ST superficie piezometrica ricostruita

## Run e calibrazione del modello transitorio

Per lo sviluppo del modello in transitorio si è provveduto ad importare le serie temporali delle quote idrometriche della Steccaia e della ricarica con relativi contributi dalle colline e dei prelievi.

Riguardo la discretizzazione temporale il modello transitorio è stato impostato con un primo stress period stazionario e 52 successivi stress periods trimestrali per 13 annualità dal 2005 al 2017.

I risultati della modellazione ottenuti per le due stazioni SIR automatiche in dx (5A ed Acquerta) e le 4 registrazioni 2012-2013 in sx (Acquapark, Stazione ENI, CD3 e Steccaia), maggiormente rappresentative, hanno inizialmente evidenziato :

- andamento generalmente concorde, ma con sottostima del modello nel periodo 2008-2012 per la stazione SIR 5A
- generale sottostima per l'intero periodo delle escursioni nella stazione SIR Acquerta;
- sovrastima della escursione 2012-2013 nella registrazione Steccaia;
- leggera sottostima assoluta del minimo 2012 nella registrazione Acquapark;
- decisa sottostima assoluta del minimo 2012 e sovrastima del recupero 2012-2013 nelle registrazioni Stazione\_ENI e e CD3

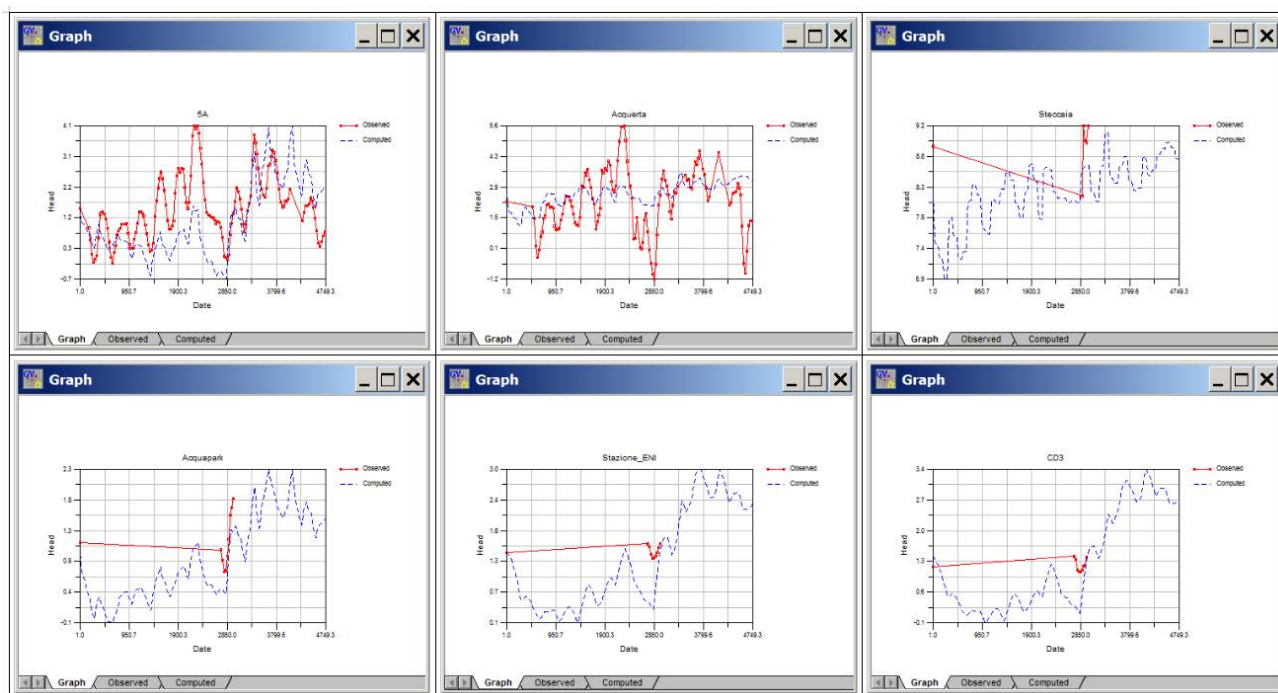


Figura 46: CCV\_TR idrogrammi iniziali delle stazioni rappresentative

Di particolare interesse e utilità per la calibrazione del modello è l'analisi degli idrogrammi delle stazioni rappresentative (fig. 46); si nota infatti soprattutto per la stazione Acquerta una risposta del modello coerente con l'andamento dei dati registrati, seppure con valori di picco decisamente attenuati. Tale comportamento è stato ricondotto ad valore in eccesso del parametro conduttanza, utilizzato nella condizione al contorno *river*.

Più in generale la maggiore o minore escursione dei livelli piezometrici può essere comunque ricondotta al parametro della storatività.

Ciò premesso è stata condotta una calibrazione automatica con PEST, relativa ai seguenti parametri:

- Conduttanza del river, con una suddivisione del F. Cecina IN 5 settori (fig. 47)
- Storatività, con calibrazione su quattro zone, corrispondenti alle tre della conduttività, e ad una quarta che prevede la distinzione tra terrazzi in dx e sx idrografica del F. Cecina (fig. 36)

Come discusso nel modello concettuale PGG ARPAT (2014) il parametro della conduttanza nella condizione al contorno per il F. Cecina rappresenta la mediazione degli scambi fiume -falda dovuta alla progressiva separazione del fiume dal sistema acquifero multistrato, per l'ispessimento dell'unità idrostratigrafica della "copertura" procedendo da monte (zona Steccaia) verso mare.

I valori di permeabilità utilizzati nel modello concettuale PGG ARPAT (2014) per i diversi litotipi erano stati gli stessi impiegati per la determinazione delle trasmissività.

In questa fase di studio, invece, la calibrazione ha indirizzato verso una riduzione dei valori di conducibilità. È stata pertanto ricalcolata l'effettiva conduttività verticale e, da questa, i parametri di leakance e conduttanza verticale partendo dalla seguente formulazione valida per un sistema multistrato come quello in esame:

$$K_v = (b_1 + b_2 + \dots + b_n) / (b_1/K_1 + b_2/K_2 + \dots + b_n/K_n)$$

Si tratta di una media armonica ponderata che esalta la presenza degli orizzonti meno permeabili.

Sulla base del DB geologico relativo alle stratigrafie già utilizzate per il calcolo della K orizzontale e relativa trasmissività, sono state così calcolate, per ogni stratigrafia le conducibilità verticali e i corrispondenti leakance. I valori puntuali sono stati poi interpolati per un ampio intorno rispetto alla posizione del F. Cecina. La mappa del parametro leakance della copertura del sistema multistrato è rappresentata nella figura successiva:

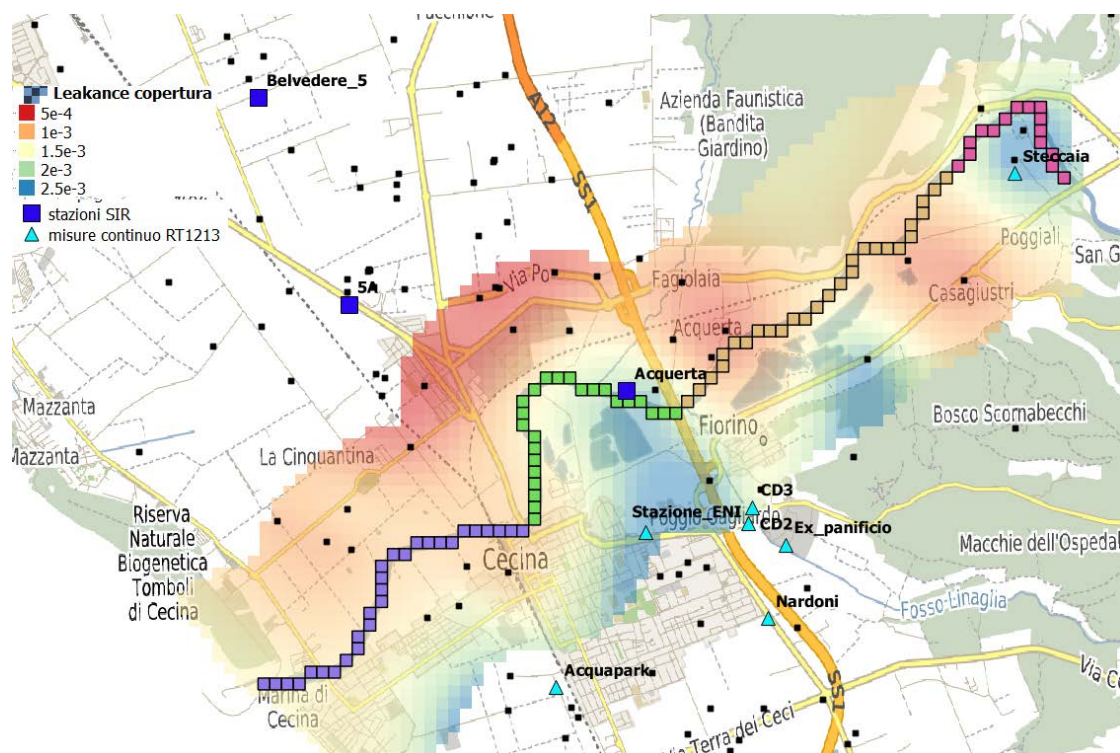


Figura 47: Leakance 1/g (Kv/spessore) della copertura dell'acquifero multistrato

I valori di massimo assoluto per il parametro leakance corrispondono all'area immediatamente a valle della Steccaia; valori di massimo relativo si hanno nella zona compresa tra la SS1 e la ferrovia, soprattutto in sx idrografica dove si colloca Poggio Gagliardo). Valori più bassi, anche di diversi ordini di grandezza, in grado di limitare se non annullare gli scambi fiume falda si sviluppano sia nel tratto successivo a quello con valori assoluti più alti fino al ponte SS1 sia, in particolare, a valle del ponte sulla ferrovia e fino al mare.

In figura 47 sono riportate anche le quattro zone di calibrazione della conduttanza della condizione al contorno *river*, per le quali sono state assunte, come limiti superiori ed inferiori, le due stime della conduttanza ricavate da Kv e Kh, ritenendo che la comunicazione fiume-falda si possa sviluppare su traiettorie anche variabili. I valori di partenza, considerata la distribuzione di tipo logaritmico, sono stati assegnati come media geometrica delle due stime

Zona	Tratto	Cond da Kv	Cond da Kh	Media Geometrica
		min	max	
1	foce - ponte ferrovia	1,3E+01	3,1E+04	6,2E+02
2	ponte ferrovia - ponte SGC	1,7E+01	8,6E+04	1,2E+03
3	ponte SGC – Pianetto	1,1E+01	3,7E+04	6,4E+02
4	Pianetto – Steccaia	2,2E+01	1,1E+05	1,6E+03

Tabella 16: Zone e valori limite per la conduttanza della condizione river

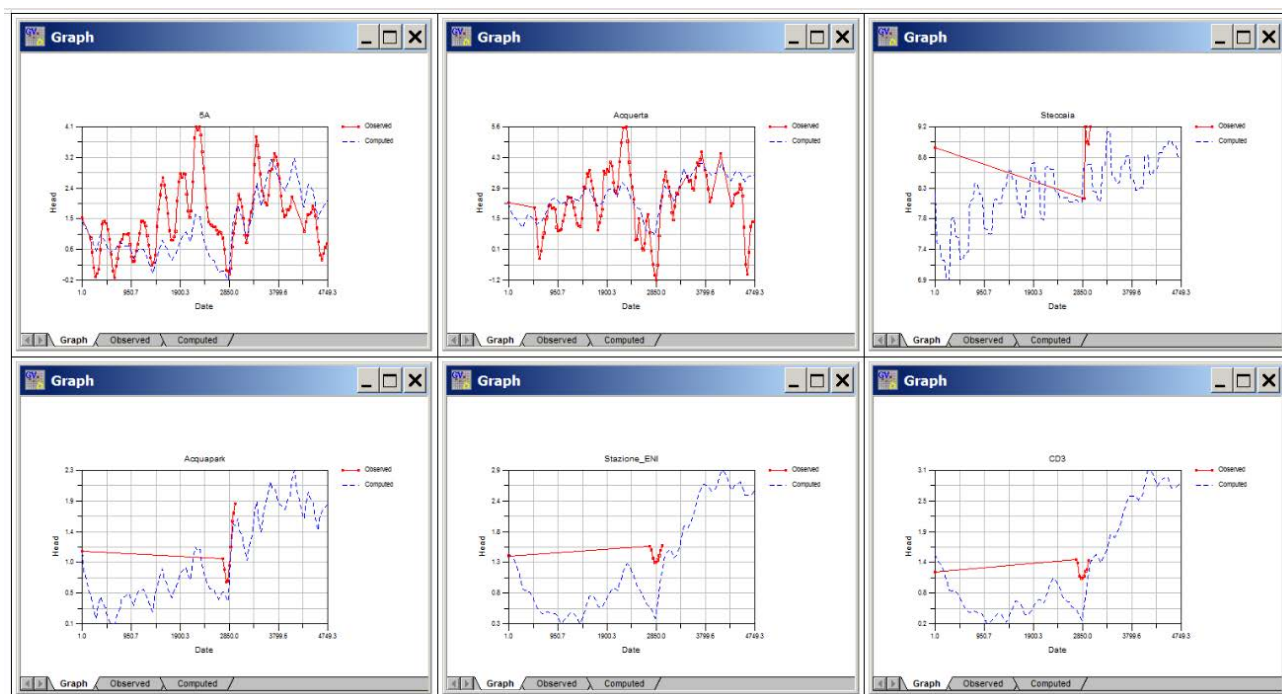
Il parametro storatività considerando le stesse zone individuate per la conduttività, è stato calibrato tenuto conto degli esiti delle prove di portata sulla base dei seguenti intervalli:

	Ss	Sy
misure	2,00E-04	1,0E-01
	5,00E-05	1,4E-01
	5,00E-07	
distr	lognorm	norm
media	<b>1,7E-05</b>	<b>1,2E-01</b>
devst	2,3E+01	2,8E-02
min max 95%	<b>3,7E-08</b>	<b>6,5E-02</b>
	<b>8,0E-03</b>	<b>1,8E-01</b>

*Tabella 17: Valori limite per la calibrazione dei parametri di storatività*

La calibrazione automatica è stata guidata dal set limitato di target transitori.

I risultati ottenuti per le due calibrazioni (conduttanza e storatività) sono nel complesso soddisfacenti, in particolare la riduzione attesa della conduttanza del river nei tratti inferiori produce un netto miglioramento della stazione SIR Acquerta. Sulle altre stazioni i miglioramenti sono stati più contenuti, anche se apprezzabili per la calibrazione del parametro storatività (Figg. 48 ÷ 52).



*Figura 48: CCV\_TR idrogrammi stazioni rappresentative dopo calibrazione*

Residual Mean	<b>0,111924</b>
Absolute Residual Mean	<b>0,917728</b>
Residual Std. Deviation	1,166956
Sum of Squares	<b>419,7597</b>
RMS Error	1,173142
Min. Residual	-4,317638
Max. Residual	2,74148
Number of Observations	305
Range in Observations	10,45
Scaled Residual Std. Deviation	0,11167
Scaled Absolute Residual Mean	0,087821
Scaled RMS Error	0,112262
Scaled Residual Mean	0,01071

Figura 49: CCV\_TR statistica residui iniziale

Residual Mean	<b>0,066522</b>
Absolute Residual Mean	<b>0,763068</b>
Residual Std. Deviation	1,005208
Sum of Squares	<b>310,675349</b>
RMS Error	1,009261
Min. Residual	-4,289939
Max. Residual	2,668564
Number of Observations	305
Range in Observations	10,45
Scaled Residual Std. Deviation	0,096192
Scaled Absolute Residual Mean	0,073021
Scaled RMS Error	0,09658
Scaled Residual Mean	0,006366

Figura 50: CCV\_TR statistica residui dopo calibrazione

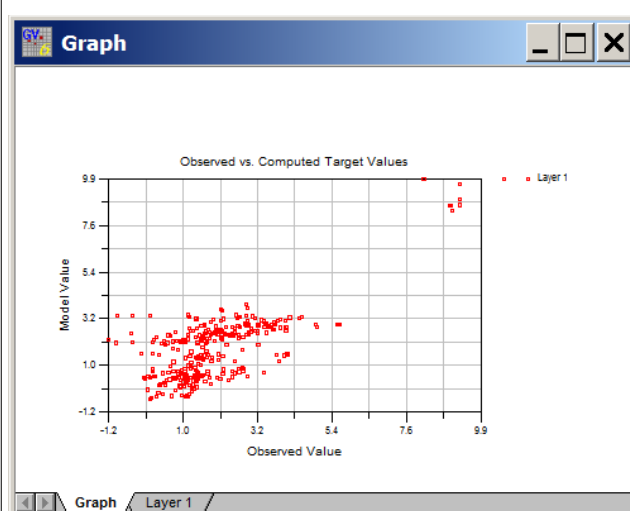


Figura 51: CCV\_TR osservato calcolato iniziale

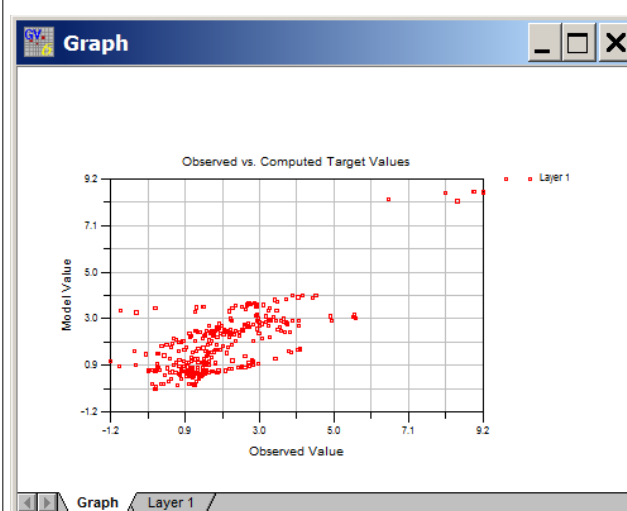


Figura 52: CCV\_TR osservato calcolato dopo calibrazione

La modifica sensibile del parametro della conduttanza del river ha imposto, inoltre, una nuova verifica del modello stazionario precedentemente calibrato. I risultati, tuttavia, hanno confermato una relativa invarianza rispetto ai dati stazionari, o comunque un leggero miglioramento.

Un'ulteriore verifica ha riguardato la verifica dei termini di bilancio del modello stazionario precedentemente calibrato. Anche in questo caso, la nuova calibrazione, pur segnando una apprezzabile riduzione del contributo del river al bilancio, conferma nel complesso i risultati già raggiunti (Figg. 53 ÷ 57).

Residual Mean	<b>0,081383</b>
Absolute Residual Mean	<b>0,911651</b>
Residual Std. Deviation	1,576421
Sum of Squares	<b>249,172772</b>
RMS Error	1,578521
Min. Residual	-6,883659
Max. Residual	7,180581
Number of Observations	100
Range in Observations	55,65
Scaled Residual Std. Deviation	0,028327
Scaled Absolute Residual Mean	0,016382
Scaled RMS Error	0,028365
Scaled Residual Mean	0,001462

Figura 53: CCV\_ST statistica residui prima calibrazione conduttanza river

Residual Mean	<b>0,008285</b>
Absolute Residual Mean	<b>0,909724</b>
Residual Std. Deviation	1,581655
Sum of Squares	<b>250,170259</b>
RMS Error	1,581677
Min. Residual	-6,885013
Max. Residual	7,183284
Number of Observations	100
Range in Observations	55,65
Scaled Residual Std. Deviation	0,028421
Scaled Absolute Residual Mean	0,016347
Scaled RMS Error	0,028422
Scaled Residual Mean	0,000149

Figura 54 CCV\_ST statistica residui dopo calibrazione conduttanza river

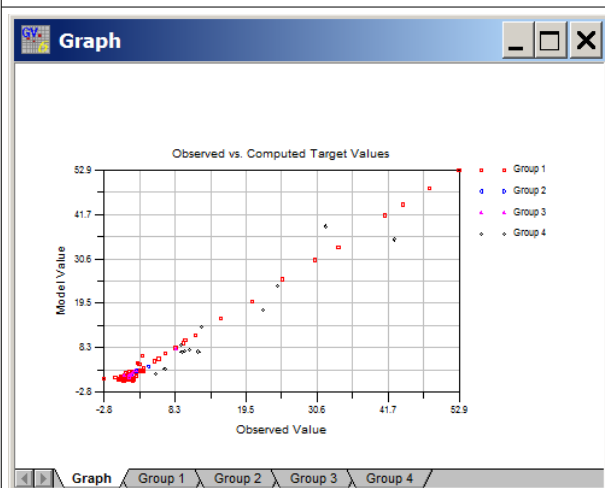


Figura 55: CCV\_ST osservato calcolato iniziale

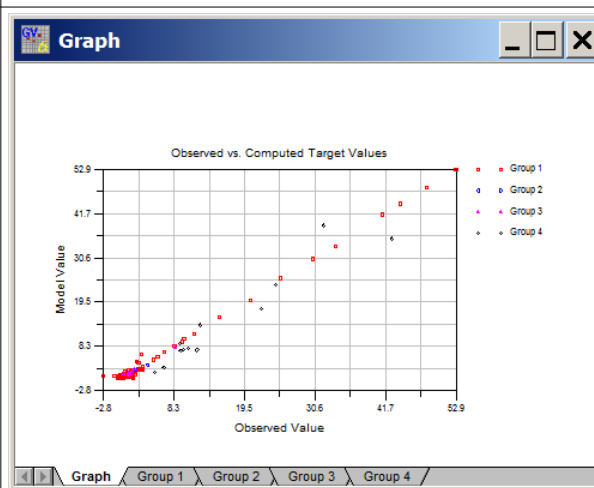


Figura 56: CCV\_ST osservato calcolato dopo la calibrazione

	prima calibrazione river		dopo calibrazione river	
	Inflow	Outflow	Inflow	Outflow
Recharge	27284	0	27284	0
ET	0	0	0	0
Constant Head	0	0	0	0
River	<b>35546</b>	<b>41319</b>	<b>33706</b>	<b>37939</b>
Lake	0	0	0	0
Drain	0	0	0	0
GHB	0	10182	0	11723
Well	<b>8559</b>	<b>19888</b>	<b>8559</b>	<b>19888</b>
Stream	0	0	0	0
Storage	0	0	0	0
Total	71389	71389	69550	69550
Error	-0,01%		-0,05%	

*Figura 57: Bilancio idrico del modello stazionario dopo la calibrazione del river*

## RISULTATI

I modelli numerici idrogeologici sviluppati, in questa fase conclusiva dello studio, in regime stazionario e transitorio rappresentano, in aggiunta ai metodi di analisi idrogeologica classici, un valido ed efficace strumento specialistico per la gestione degli attingimenti idrici, permettendo, oltre alla predisposizione di scenari di simulazione piezometrica, anche un'analisi dei diversi termini di bilancio.

A questo proposito, sfruttando gli output di un modello idrogeologico, una rappresentazione particolarmente efficace è stata indicata da ARPA Emilia Romagna (2011) per la gestione del Conoide del Marecchia a supporto della previsione e gestione delle emergenze idriche.

Gli autori definiscono una curva di “immagazzinamento netto cumulato”, per l'intero periodo transitorio, ottenuta sommando la differenza dei flussi in ingresso ed uscita dalla componente di storage moltiplicati per i corrispondenti step temporali.

Sulla base delle suddetta curva, determinata annualmente dall'aggiornamento periodico del modello di flusso ed integrata da eventuali previsioni, è possibile analizzare la funzione serbatoio del corpo idrico e, conseguentemente, indirizzare l'utilizzo del sistema acquifero.

In generale i volumi idrici emunti dovrebbero riferirsi alle riserve regolatrici ( $W_r$ ), ciò al fine di non alterare, anche in modo irreversibile, gli equilibri idrici del sistema acquifero. A titolo esplicativo nella figura 58 sono riportate le diverse casistiche e tipologie di risorse e riserve dei sistemi acquiferi.

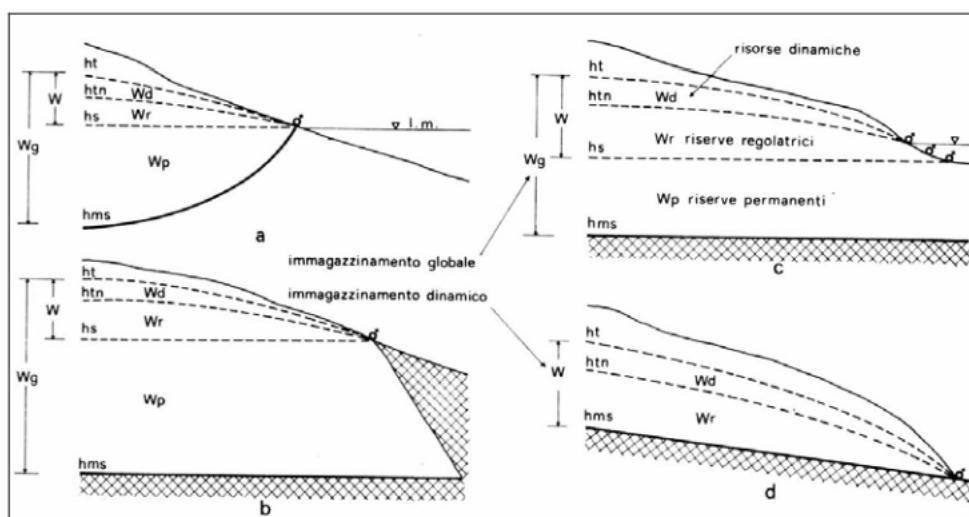


Figura 58: Riserve permanenti ( $W_p$ ), riserve regolatrici ( $W_r$ ), risorse dinamiche ( $W_d$ ) in vari tipi di acquifero.

Ciò premesso, sono nel seguito analizzati i termini di bilancio idrico dell'acquifero costiero denominato Cecina Valle , composto da 7199 celle attive delle quali 143 wells, 94 river e 168 ghb.

I dati di bilancio complessivi del modello stazionario (Fig. 59), basato sulle medie del periodo 2005-2017, evidenziano come le condizioni river e recharge contribuiscano a ricaricare il sistema in misura simile con 12 e 10 Mmc rispettivamente. Un contributo discreto, sebbene subordinato, deriva dai rilievi collinari e pari 3,1 Mmc/anno (well inflow).

Il fiume appare ancora il principale termine di uscita del sistema con 14 Mmc ca., sebbene i prelievi da pozzi estraggono una quantità notevole di circa 7 Mmc. Il deflusso a mare è valutato in 4 Mmc (ghb).

	Inflow			Outflow		
	mc/g	Mmc/anno	mm/anno	mc/g	Mmc/anno	mm/anno
Recharge	27284	10,0	138	0	0,0	0
River	33706	12,3	171	37939	13,8	192
GHB	0	0,0	0	11723	4,3	59
Well	8559	3,1	43	19888	7,3	101

Tabella 18: Bilancio medio annuo stazionario

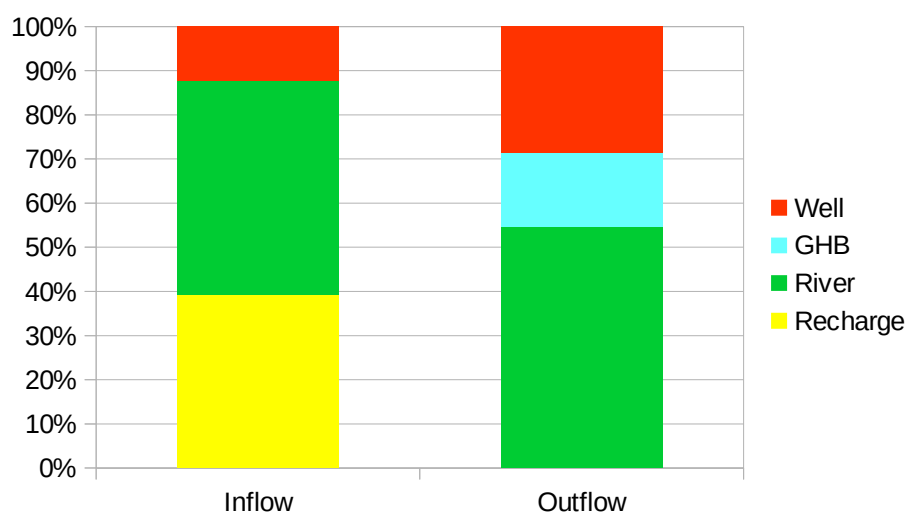


Figura 59: Bilancio Idrico del Modello Stazionario CCV\_ST

Il quadro idrico rappresentato in stato stazionario si completa con l'analisi del lungo periodo simulato in transitorio come rappresentato nelle due figure successive, dove sono diagrammati i risultati dei 52 stress period trimestrali e time step mensili.

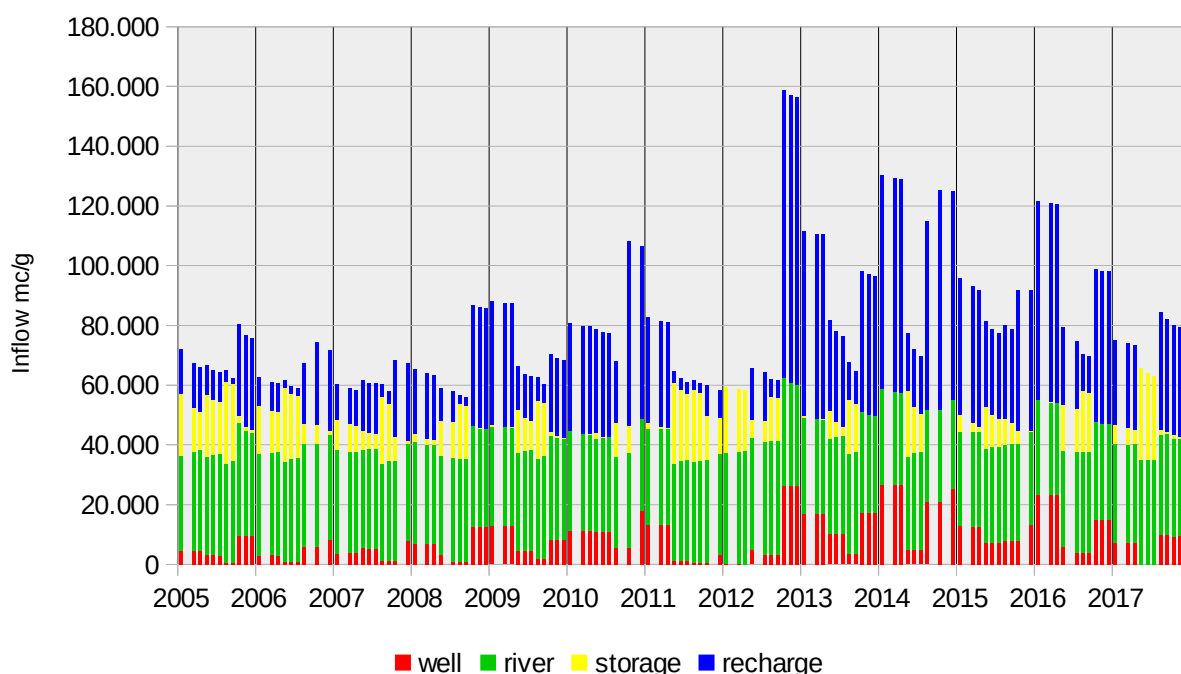


Figura 60: Afflussi del Modello Transitorio CCV\_TR

Per quanto riguarda gli afflussi, gli elementi più caratteristici del periodo, in precedenza discussi nell'analisi delle serie temporali, indicano un primo incremento della ricarica a partire dal 2009,

seguito da un brusco arresto tra la fine del 2011 ed il 2012. A partire dalla fine del 2012 si ha una brusca ripresa degli afflussi, seguita da un generale decremento negli anni successivi.

Il grafico rende evidente come a fronte di una riduzione della ricarica si attivano altre fonti di ingresso quali lo storage, cioè lo svuotamento del serbatoio acquifero, e lo stesso river.

Il diagramma dei deflussi mostra una lieve diminuzione degli emungimenti a partire dal 2013 e rende evidente la funzione regolatrice del sistema acquifero, mostrando un incremento dello storage. Negli anni di maggiore ricarica, infatti, una discreta quota degli afflussi è immagazzinata e, come visto, rilasciata successivamente. Il deflusso a mare del sistema acquifero, rappresentato nel modello dalla condizione al contorno ghb, si rileva con un minimo positivo anche in occasione della magra del 2012.

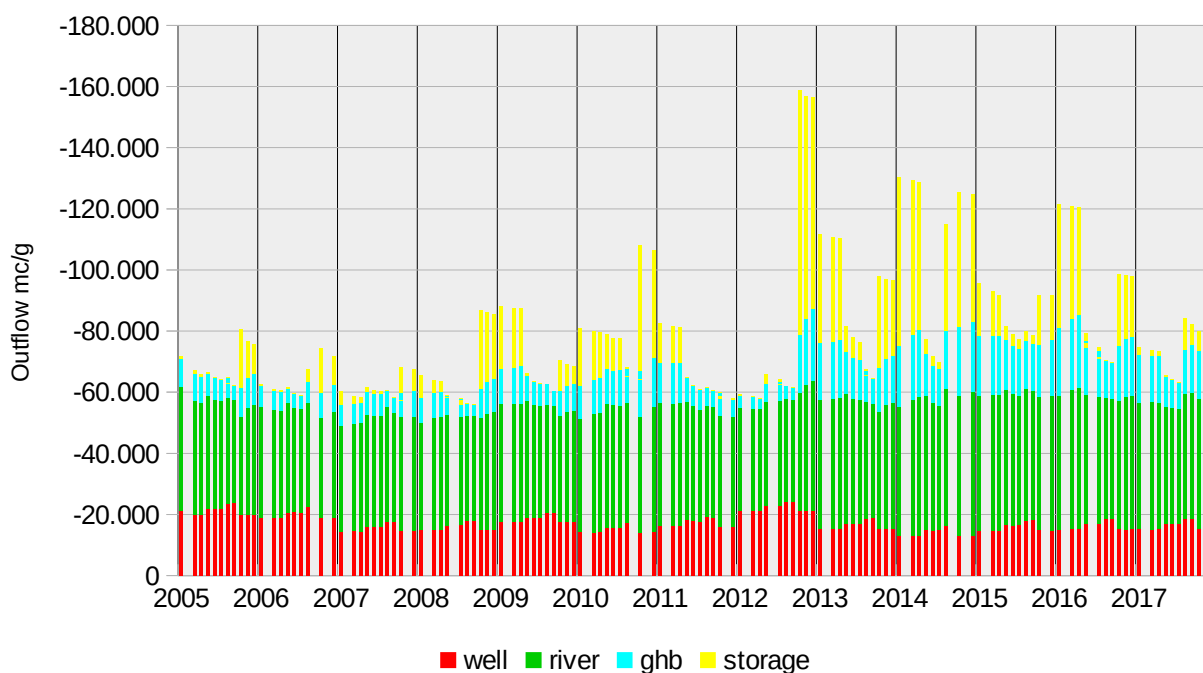
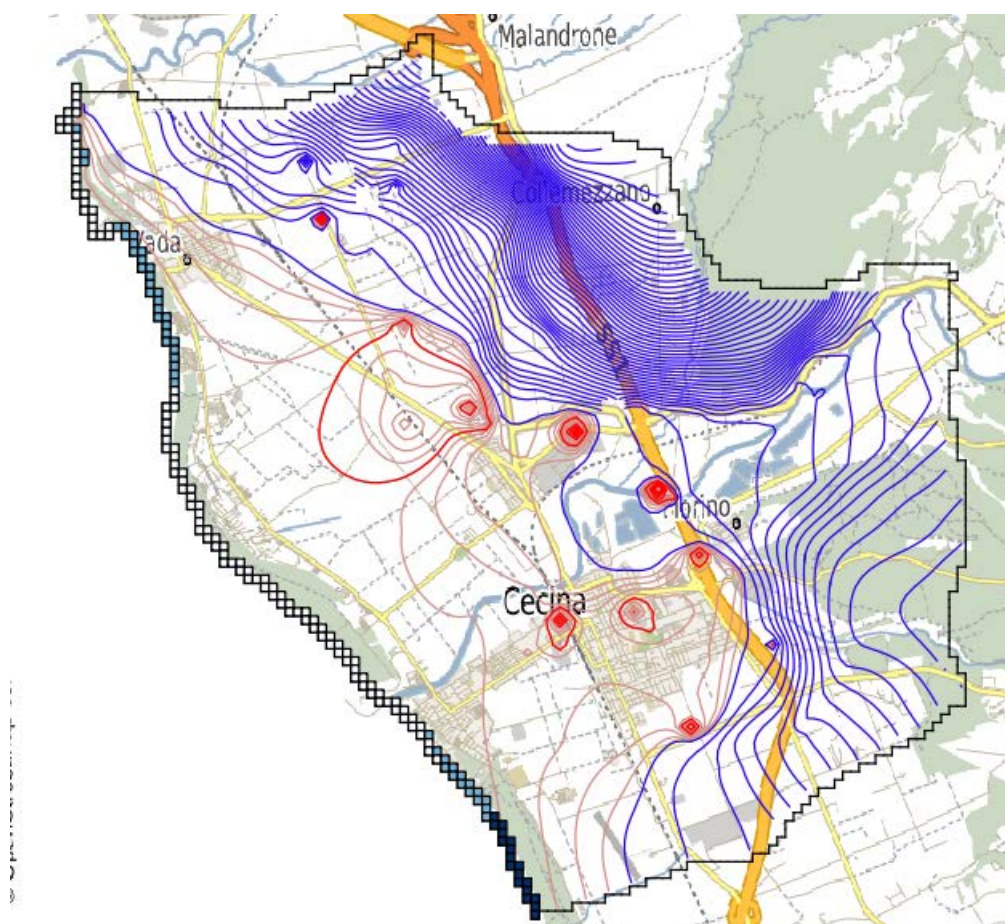


Figura 61: Deflussi del Modello Transitorio CCV\_TR

Una verifica più puntuale è offerta dalla mappa piezometrica simulata relativa alla fine settembre 2012 (Fig. 62) e dai corrispondenti flussi di scambio con la condizione ghb del mare.

I valori del deflusso a mare si mantengono sempre in uscita, anche se nell'ampio tratto corrispondente all'area della Mazzanta si riducono a valori molto bassi, praticamente nulli. Nelle condizioni di deflusso minimo a mare si possono innescare localmente fenomeni di ingressione di

acqua salata per “upconing” come quelli segnalati nell’area a nord di San Pietro in Palazzi e nel centro abitato di Cecina.



*Figura 62: Mappa piezometrica relativa all'episodio critico del periodo di fine settembre 2012. Isopieze di 1 m, in rosso i valori inferiori al livello medio mare, tratto fine 0,2 m*

In analogia a quanto indicato da ARPAE (2010), è stato calcolato per il sistema acquifero Cecina Valle l'idrogramma dell'immagazzinamento netto cumulato (Fig. 63).

Il grafico esprime i volumi invasati nel tempo a partire dalla crisi idrica di fine estate 2012.

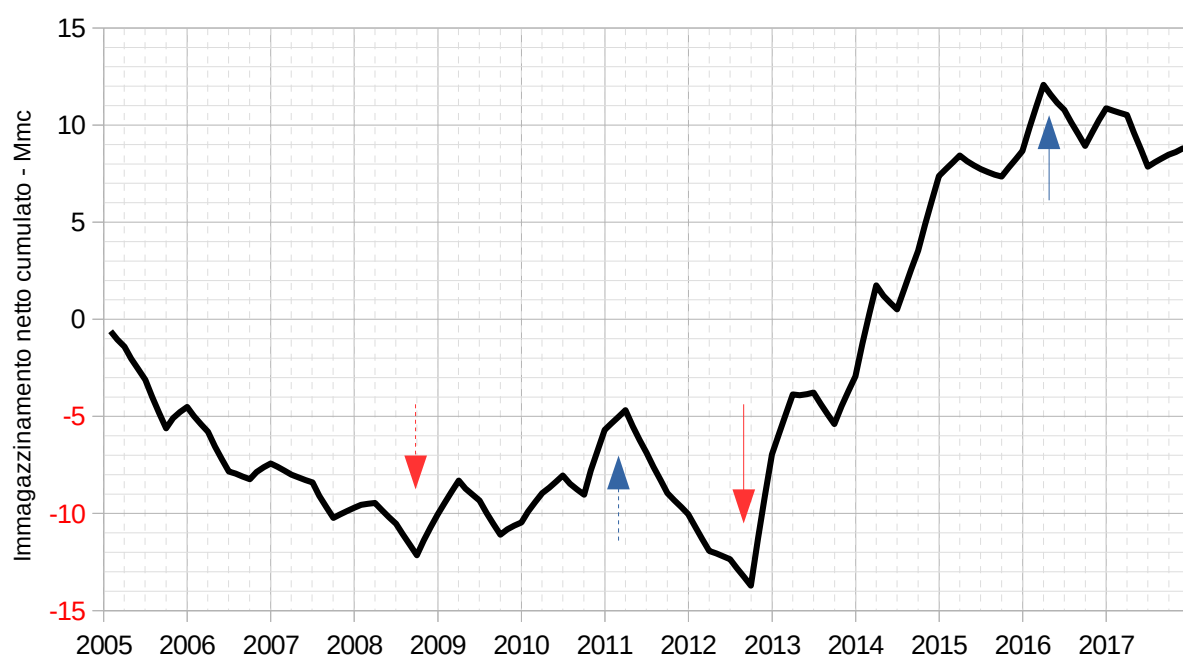


Figura 63: Idrogramma dell'immagazzinamento netto cumulato per il modello Cecina Valle

Applicando alla serie temporale dell'immagazzinamento netto cumulato la stessa tecnica di decomposizione già utilizzata per le registrazioni idrometriche sono state determinate analiticamente le escursioni nel periodo delle componenti trend e seasonal che rappresentano rispettivamente, la riserva regolatrice  $W_r$  con le sue oscillazioni pluriennali e la risorsa dinamica  $W_d$  a carattere stagionale (Fig. 64).

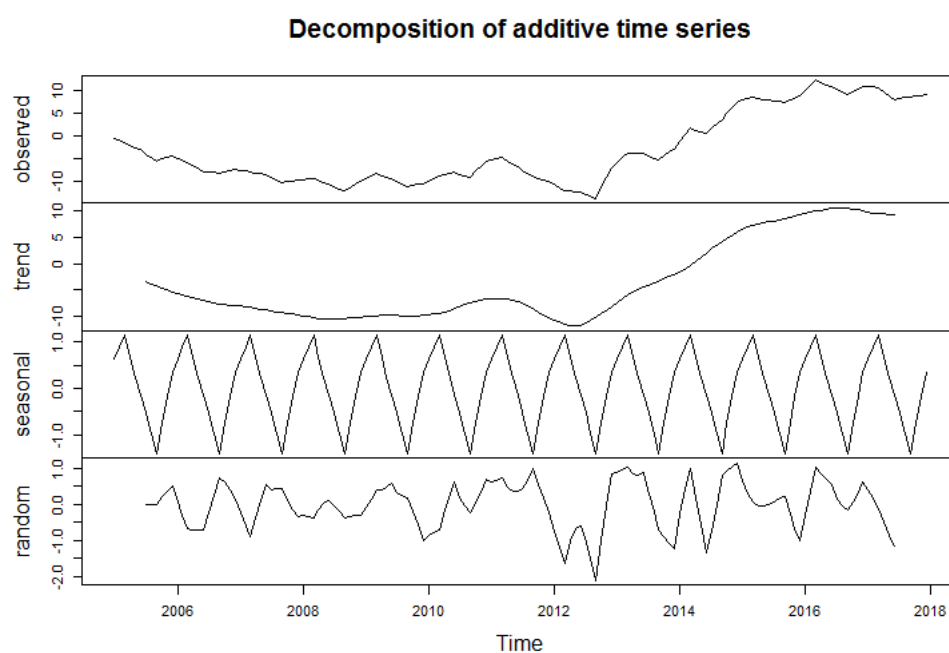


Figura 64: Decomposizione della serie temporale immagazzinamento netto cumulato

Con riferimento alla figura 64 le escursioni dei due termini valutate attraverso la decomposizione sono risultate in:

- Wd risorsa dinamica : 2,5 Mmc
- Wr riserva regolatrice: 22 Mmc

Assumendo come riferimento lo stesso episodio critico di fine estate 2012, calcolando la differenza tra la superficie di bottom e la corrispondente piezometria, si è ottenuto un quantitativo di riserva permanente uguale a:

- Wp riserva permanente: 277 Mmc di cui il 2,5 % in pressione (7 Mmc)

Tali valori possono essere confrontati con i volumi di prelievo Q, compresi tra 4,8 ed 8,8 Mmc e con una media di 6,4 Mmc nel periodo modellizzato, ottenendo:

$$Wd < Q < Wr/2$$

I prelievi eccedono normalmente la risorsa dinamica indicano la possibilità su scala pluriennale di condizione di potenziale stress. D'altro lato i volumi di prelievo non sembrano eccedere la riserva regolatrice media, garantendo verosimilmente su cicli pluriennali il riassorbimento di deficit temporanei.

In particolari condizioni avverse con ripetuti trend climatici negativi, è comunque necessario monitorare la riserva idrica regolatrice, intervenendo con anticipo sulla gestione dei prelievi. Il tempo di esaurimento ( $Wr/Q$ ) è infatti compreso mediamente tra poco meno di due anni (11/6) e non più di cinque – sei anni.

Lo stesso bilancio analitico è realizzabile anche su porzioni discrete del sistema acquifero come rappresentate, in esempio, dai corpi idrici già identificati dalla Autorità di Bacino (A, B, M).

I diversi caratteri idrogeologici di questi tre corpi idrici sono ben descritti dai tre idrogrammi dell'immagazzinamento netto cumulato (Figg. 65 ÷ 67).

Il corpo idrico A presenta la maggiore capacità di immagazzinamento ma è quello maggiormente dipendente alla ricarica, in presenza di eventi critici come il 2012, ha mostrato una forte escursione con un minimo molto pronunciato.

Il corpo idrico M di spessori e dimensioni minori ha una capacità di immagazzinamento molto più limitata, ma la sua diretta connessione con il Fiume Cecina ha permesso negli anni una relativa costanza dei livelli idrometrici che appaiono, nel complesso, in generale incremento.

Il corpo idrico B ha caratteristiche intermedie tra quelle dei corpi idrici A e B, mostrando una discreta capacità di immagazzinamento. La connessione è seppure indiretta con il Fiume Cecina il che gli ha permesso nel 2012 di non raggiungere il minimo idrico assoluto.



Figure 65: Idrogramma dell'immagazzinamento netto cumulato per il corpo idrico "A" (dx Fiume Cecina)

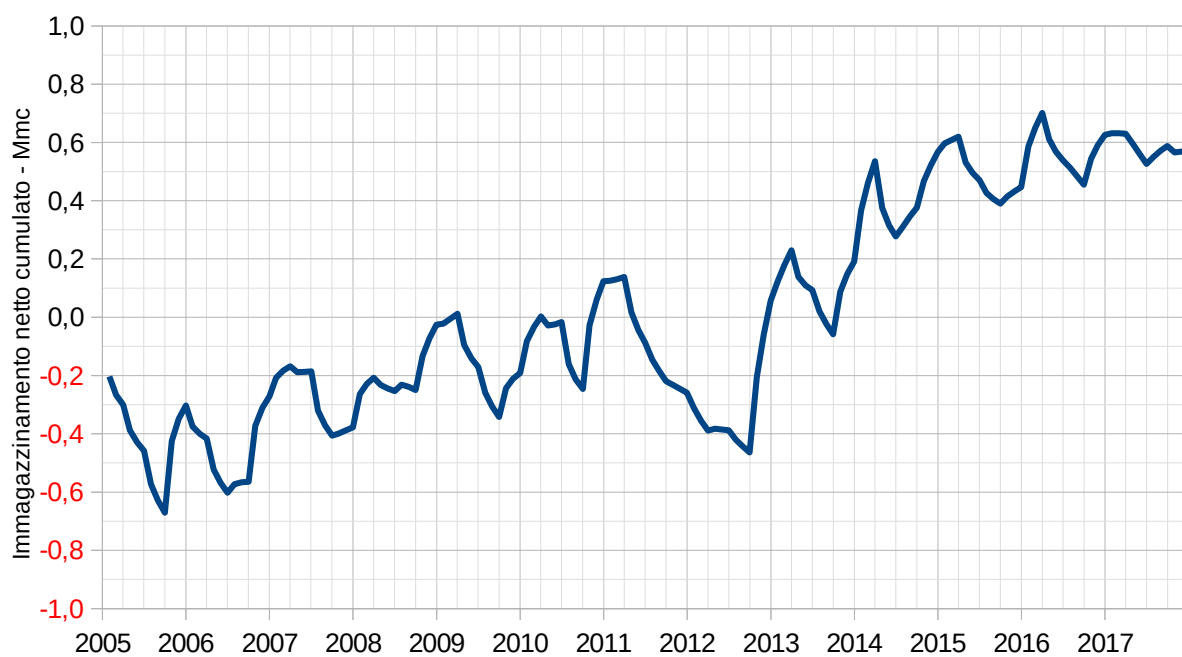


Figure 66: Idrogramma dell'immagazzinamento netto cumulado per il corpo idrico "M" (alluvioni Fiume Cecina)

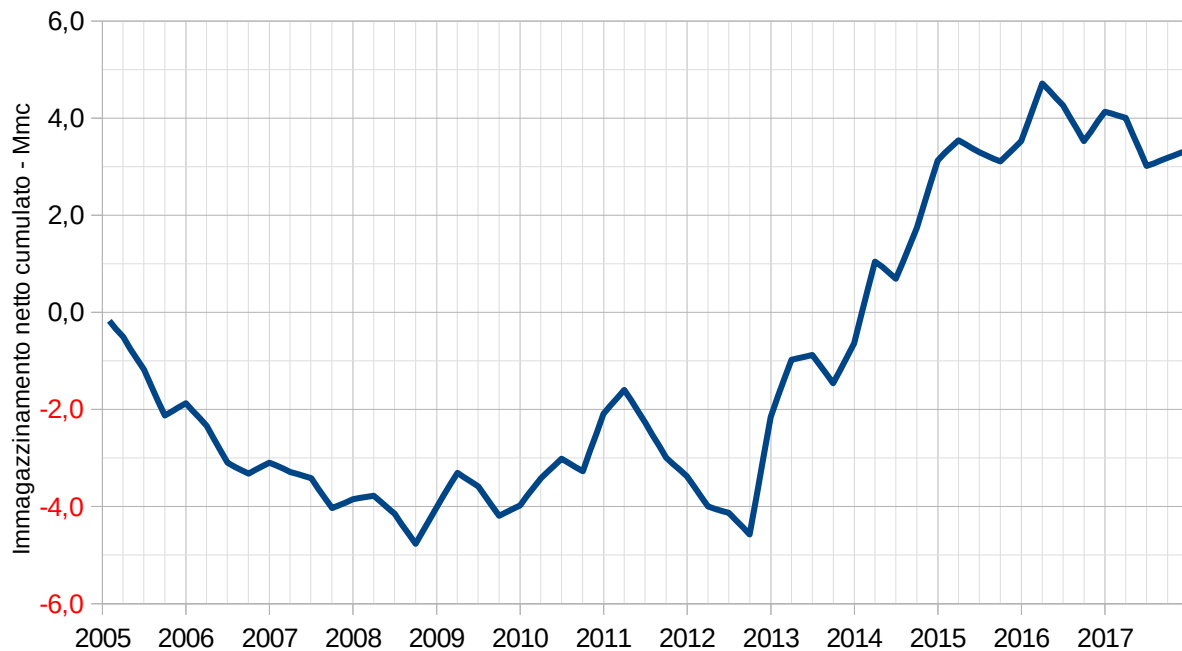


Figure 67: Idrogramma dell'immagazzinamento netto cumulado per il corpo idrico "B" (sx Fiume Cecina)

## CONCLUSIONI

Il presente rapporto conclude le attività istituzionali non obbligatorie (INO) “Modellistica idrogeologica per la gestione della disponibilità delle risorse idriche” realizzate da ARPAT per Regione Toscana come da DDRT n° 9987 del 5/2/2017.

**Il modello idrogeologico “CCV - Cecina Valle”, compreso tra Ponte della Steccaia ed il Mare e corrispondente agli acquiferi M, A e B dell’Autorità di Bacino Regionale Toscana Costa è stato aggiornato al 31/12/2017** sia come modello concettuale, sia come modello matematico in stato stazionario e transitorio. Il lavoro di implementazione è stato svolto sulla base di nuovi dati derivati dalle stazioni SIR, da elaborazioni modellistiche e dai prelievi da pozzi forniti dal gestore ASA e dal Genio Civile. In questo modo il periodo analizzato si estende per 13 anni dal 01/01/2005 al 31/12/2017.

Nella fase di aggiornamento del **modello concettuale** i risultati più significativi sono stati ottenuti dall’analisi delle serie temporali sui dati di pioggia, di deflusso superficiale e di livello freaticometrico, evidenziando in particolare:

- la stagionalità delle piogge e dei deflussi superficiali con massimi in ottobre, novembre e minimi estivi in agosto e settembre;
- l’esistenza di periodicità pluriennali nell’ordine di 4 – 5 anni, con il 2011 e 2014 come anni di massimo e il 2012 come anno di magra;
- la necessità di utilizzare, come già fatto per i modelli originari, stress periods di durata trimestrale.

Nella successiva fase di affinamento del **modello matematico** è stata necessaria una importante fase di calibrazione condotta con il software **PEST** in modalità automatica, seppure con un lavoro di “supervisione e validazione” dei dati di input e output in ragione di una variabilità realistica delle condizioni idrogeologiche.

In questa fase è risultata molto utile l’analisi degli idrogrammi iniziali delle stazioni SIR maggiormente rappresentative (5A, Acquerta, Acquapark, Stazione ENI, CD3 e Steccaia) per individuare i termini (conduttanza e di storatività) più sensibili alla calibrazione.

La ridefinizione della conduttanza per ogni stratigrafia del DB geologico ha permesso la revisione anche dei valori di leakance. I valori di massimo assoluto corrispondono all’area immediatamente a valle della Steccaia; valori di massimo relativo si hanno nella zona compresa tra la SS1 e la ferrovia, soprattutto in sx idrografica dove si colloca Poggio Gagliardo). Valori più bassi, anche di diversi ordini di grandezza, in grado di limitare se non annullare gli scambi fiume falda si

sviluppano sia nel tratto successivo a quello con valori assoluti più alti fino al ponte SS1 sia, in particolare, a valle del ponte sulla ferrovia e fino al mare.

In questa fase conclusiva dello studio, in analogia a quanto indicato da ARPAE (2010), sono state inoltre maggiormente evidenziate le potenzialità dei modelli numerici idrogeologici sviluppati, in regime stazionario e transitorio, come strumento specialistico per la gestione del bilancio idrico con particolare attenzione agli attingimenti idrici. È stato infatti calcolato per il sistema acquifero Cecina Valle l'**idrogramma dell'immagazzinamento netto cumulato**. Tale elaborazione, con l'aggiornamento periodico del modello di flusso e l'integrazione di eventuali previsioni, permette di analizzare la funzione serbatoio del corpo idrico e, conseguentemente, di indirizzare l'utilizzo del sistema acquifero.

Applicando alla serie temporale dell'immagazzinamento netto cumulato la tecnica di decomposizione in tre distinte componenti di **trend**, **stagionale** e **random** sono state determinate analiticamente le escursioni nel periodo delle componenti trend e seasonal che rappresentano rispettivamente, la riserva regolatrice  $W_r$  (2,5 Mmc) con le sue oscillazioni pluriennali e la risorsa dinamica  $W_d$  (22 Mmc) a carattere stagionale.

Tali valori confrontati con i volumi di prelievo  $Q$ , compresi tra 4,8 ed 8,8 Mmc e con una media di 6,4 Mmc nel periodo modellizzato, indicano la possibilità su scala pluriennale che si verifichi una condizione di potenziale stress idrico. I volumi di prelievo non sembrano comunque eccedere la riserva regolatrice media, garantendo verosimilmente su cicli pluriennali il riassorbimento di deficit temporanei.

**In particolari condizioni avverse con ripetuti trend climatici negativi, è comunque necessario monitorare la riserva idrica regolatrice, intervenendo con anticipo sulla gestione dei prelievi. Il tempo di esaurimento ( $W_r/Q$ ) è infatti compreso mediamente tra poco meno di due anni e non più di cinque – sei anni.**

Lo stesso bilancio analitico è stato realizzato anche su porzioni discrete del sistema acquifero come rappresentate, ad esempio, dai corpi idrici già identificati dalla Autorità di Bacino (A, B, M).

Il corpo idrico A presenta la maggiore capacità di immagazzinamento ma è quello maggiormente dipendente alla ricarica, in presenza di eventi critici come il 2012, ha mostrato una forte escursione con un minimo molto pronunciato.

Il corpo idrico M di spessori e dimensioni minori ha una capacità di immagazzinamento molto più limitata, ma la sua diretta connessione con il Fiume Cecina ha permesso negli anni una relativa costanza dei livelli idrometrici che appaiono, nel complesso, in generale incremento.

Il corpo idrico B ha caratteristiche intermedie tra quelle dei corpi idrici A e B, mostrando una discreta capacità di immagazzinamento. La connessione seppure indiretta con il Fiume Cecina ha permesso nel 2012 di non raggiungere il minimo idrico assoluto.

## BIBLIOGRAFIA

ARPAT UNIFI (2008): GNDICI UO Firenze, *Valutazione del Rischio di Inquinamento delle Acque sotterranee da Nitrati: approccio e validazione su test site*, ZVN Cecina (LI)

ARPAT (2003): *Studio idrogeologico con utilizzo di modelli numerici di simulazione per la definizione dei meccanismi d'arricchimento in nitrati delle acque sotterranee nell'area compresa tra gli stradoni del Lupo, del Tripesce, la SS. n° 206, Vada e S. Pietro in Palazzi* - Relazione finale, gennaio 2003

[http://www.provincia.livorno.it/fileadmin/Difesa\\_e\\_Protezione\\_del\\_Territorio/Arpat\\_20Relazione\\_20finale.pdf](http://www.provincia.livorno.it/fileadmin/Difesa_e_Protezione_del_Territorio/Arpat_20Relazione_20finale.pdf).

ARPAT (2006): *Applicazione della Direttiva Comunitaria 2000/60/CE nel Bacino del Fiume Cecina in Qualità di Bacino Pilota - Sistema Informativo Territoriale del Bacino del Cecina Applicazione dei Modelli allo Studio del Bacino Pilota. Parte Prima: Aspetti Quantitativi della Risorsa*, Febbraio 2006  
[http://sira.arpat.toscana.it/sira/documenti/Relazione\\_Cecina\\_Modelli\\_Tutela\\_Quantitativa.pdf](http://sira.arpat.toscana.it/sira/documenti/Relazione_Cecina_Modelli_Tutela_Quantitativa.pdf)

ARPAT (2013): *Accordo di Programma per l'attuazione degli interventi urgenti per la bonifica della falda acquifera a seguito inquinamento da organoalogenati Comuni di Montescudaio (PI) e Cecina (LI) - Modello di Flusso e Trasporto*; Relazione Finale, novembre 2013.

<http://www.arpat.toscana.it/documentazione/report/organoalogenati-modello-di-flusso-e-trasporto-nella-pianura-del-fiume-cecina>

ARPAT (2016): *Modellistica del Bacino del Cecina per la tutela quantitativa l'ottimale gestione delle risorse idriche della Val di Cecina e nella fascia costiera livornese compresa tra Rosignano e Bibbona* - Regione Toscana.

ARPAE (2011): *Collaborazione tra ARPA e Agenzia Regionale di Protezione Civile per l'aggiornamento periodico del modello di flusso delle acque sotterranee della Conoide del Fiume Marecchia a supporto della previsione e gestione delle emergenze idriche*, anno 2010. Bologna, gennaio 2011.

ASA (2010): *Concessione di derivazione di acque sotterranee ad uso idropotabile Pozzo 1 in loc. Casa Giusti Montescudaio*

Campo L., Caparrini F., Castelli (2006): *Use of multi-platform, multitemporal remote-sensing data for calibration of a distributed hydrological model: an application in the Arno basin, Italy*. Hydrol. Process., 20, 2693–2712, 2006

Cerrina Feroni A., Doveri M., Ellero A., Lelli M., Marini L., Masetti G., Nisi B., Raco B. (2009): *Caratterizzazione geologica, idrogeologica e idrogeochimica dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi della Regione Toscana (CISS) 32CT010 "Acquifero costiero tra Fiume Cecina e San Vincenzo", 32CT030 "Acquifero costiero tra Fiume Fine e Fiume Cecina", 32CT050 "Acquifero del Cecina"*

Di Luca M., Montagnani F. (2001): *Pozzo V. Della Macchia" Comune di Cecina (LI), Relazione tecnica sui risultati della perforazione e del collaudo*

Doherty J.E., Fienen M.N., Hunt R.J., (2010): *Approaches to highly parameterized inversion: Pilot-point theory, guidelines, and research directions: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5168*, 36 p.

Fiaschi S., Murratzu A. (2001): *Prove di portata di lunga durata presso la centrale di Santo Pietro in Palazzi*. Azienda Servizi Ambientali Livorno.

Harbaugh A.W., McDonald M.G. (1996): *User's documentation for MODFLOW-96 an update to the U.S. Geological Survey modular finite difference groundwater model U.S. Geol. Surv. Open-File Rep, 96-485*.

Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. (2001): *Soil and Water Assessment Tool. User's Manual* USDA ARS Grassland Soil and Water Research Laboratory,

Provincia di Pisa (2011): *Richiesta di concessione di derivazione acque pubbliche sotterranee ad uso idropotabile dai pozzi denominati Steccaia 1 e Steccaia 2 in Comune di Montescudaio. Esecuzione prove di pompaggio sull'area (settembre ottobre 2011) valutazione dei risultati*.  
Provincia di Pisa, Servizio Difesa del Suolo, U.O. Georisorse

Prudic D.E. (1989): *Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite-difference, ground-water flow model*. U.S. Geol. Surv. Open-File Rep, 88-729.

Ruffini (2005): *Autorizzazione alla ricerca di acque sotterranee il località Poggio al Pruno Paratino*. Relazione interna ASA

Regione Toscana (2006): *Progetto di Bonifica di un sito contaminato da organoalogenati in Comune di Montescudaio (PI)*. Piano della Caratterizzazione. Risultati delle Indagini, giugno 2006.

Wuertz D., Setz T., Chalabi Y. (2017) - timeSeries: Rmetrics - Financial Time Series Objects - <https://cran.r-project.org/web/packages/timeSeries/index.html>