

PIRENZE, FORTEZZA DA BASSO
13/16 OTTOBRE 2021

EARTH TECHNOLOGY EXPO

***LA SENSORIZZAZIONE TERRITORIALE E LA MODELLISTICA
PER LA PREVISIONE DELLE CONTAMINAZIONI IN FUNZIONE
DELLA
PROTEZIONE AMBIENTALE***

14 ottobre 2021

***Monitoraggio in continuo e modellistica
per la protezione dei corpi idrici***

Stefano Menichetti
Direzione Tecnica – SIRA Sistema Informativo Regionale Ambientale
s.menichetti@arpat.toscana.it

- Protezione dei corpi idrici ex **Direttiva Quadro 2000/60/CE**
 - Le Reti di Monitoraggio **ARPAT**:
 - **Sorveglianza** / **Operativo** / **Indagine**
 - Le Reti **SIGR**: termo-pluviometrica / idrometrica / freaticometrica
 - Strumenti e tecnologie:
 - **Stazioni** automatiche di **monitoraggio** in **continuo**
 - analisi **serie temporali**
 - **soglie di intervento**
 - **Modellistica** numerica **idrogeologica**
 - **Flusso**
 - **Trasporto**
 - Analisi **geostatistica** dei pennacchi di contaminazione

- La Regione Toscana ha incaricato ARPAT del **monitoraggio ambientale** dei **corpi idrici toscani**, già a partire dal 2002-2003.
 - Secondo il dettato della Direttiva Quadro 2000/60/CE [WFD] e Direttiva Sorella Acque Sotterranee 2006/118/CE [GWDD], attuate dal DLgs 152/2006, DLgs 30/2009 sono stati:
 - Caratterizzati i **bacini idrografici**;
 - Identificati i **corpi idrici significativi**
 - Scelti i punti di prelievo, promossi a **stazioni di monitoraggio**, ed applicati **protocolli analitici specifici secondo le pressioni** per la determinazione di **indicatori**:
 - Ecologici
 - Chimici
 - Quantitativi

A cosa servono i dati del monitoraggio ?

- definiscono le **classificazioni** ambientali per la verifica di **Obiettivi** specifici del Piano di Tutela delle Acque e Piano di Gestione
 - “**buono stato**” con verifiche 2015 => 2021 => 2027
- controllano **Aree a specifica protezione** quali:
 - Zone Vulnerabili da Nitrati 91/676/CE
 - Aree Sensibili 91/271/CE
 - Aree di salvaguardia delle acque destinate al consumo umano
 - Zone vulnerabili da fitofarmaci



Analisi delle Pressioni e degli Impatti

- I programmi di monitoraggio attuati in Toscana, a partire dal 2010, sempre secondo la Direttiva Quadro WFD 2000/60, classificano **preventivamente** i corpi idrici secondo:
 - **pressioni** potenziali
 - **impatti** accertati
- Corpi idrici “**a rischio**” e “**non a rischio**” del raggiungimento del **buono stato** alla scadenza del periodo
- Analisi ultima => luglio 2021

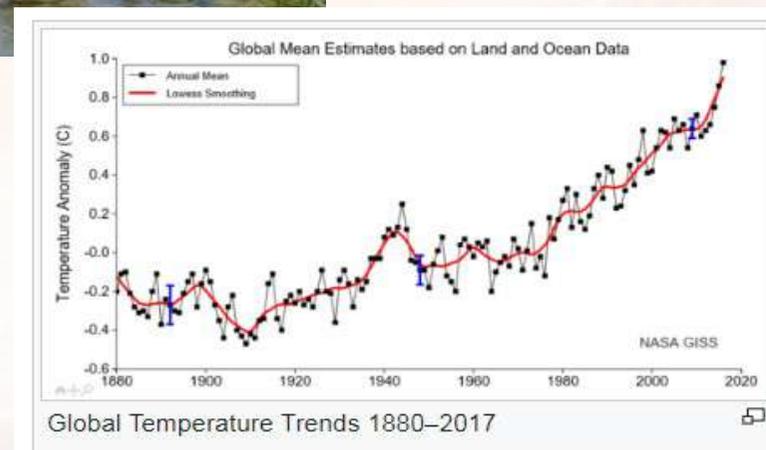


<http://www.arp.at.toscana.it/documentazione/catalogo-pubblicazioni-arp.at/analisi-ambientali-a-supporto-delle-attivita-di-tutela-quali-quantitativa-e-della-gestione-delle-risorse-idriche>

<http://sira.arp.at.toscana.it/apex2/f?p=IMPRESS>

Monitoraggio di Sorveglianza

- Per tutti i corpi idrici il **monitoraggio di sorveglianza** ha la finalità di:
 - integrare e convalidare i risultati dell'**analisi di pressioni impatti** e **classificare** il corpo idrico.
- La ricerca dei parametri è ampia e tesa a valutare **tendenze a lungo termine** di **origine naturale** e/o da **diffuse** attività di origine antropica.



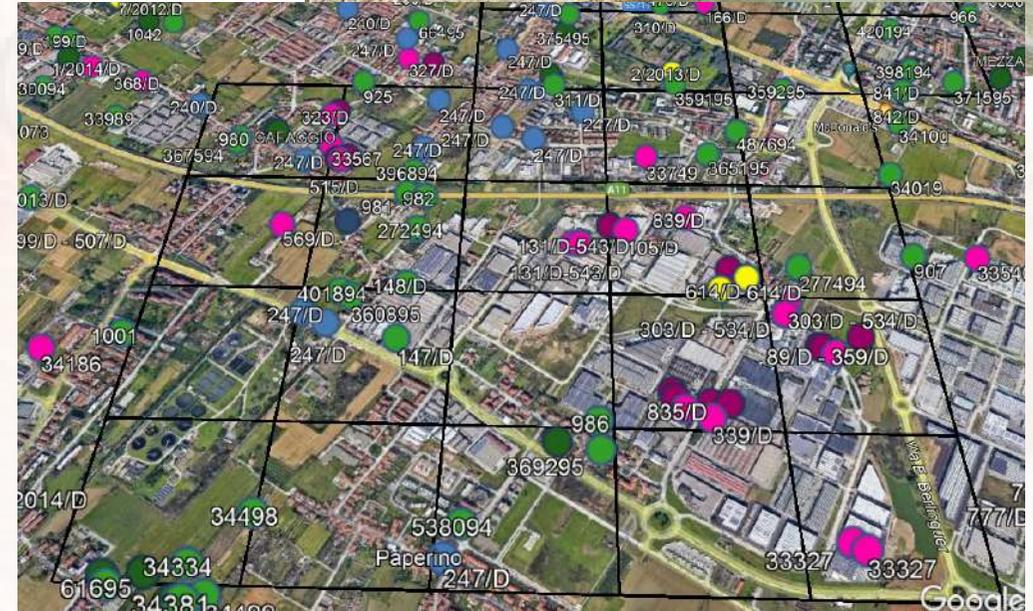
Monitoraggio Operativo

- Per i soli corpi idrici classificati a **rischio** il **monitoraggio operativo** ha la finalità:
 - valutare qualsiasi **variazione** dello stato di tali corpi idrici risultante dai **programmi di misure**;
 - stabilirne lo **stato** ed una classificazione benché parziale.
- La frequenza è maggiore, **annuale**, benché concentrata sui parametri a rischio.



Monitoraggio Indagine

- Quando non sono completamente note le **ragioni del mancato** raggiungimento del **buono stato** si attua un **monitoraggio investigativo**, per un periodo limitato, finalizzato a:
 - **appurare le fonti di pressione**
 - comprendere i **processi** di scadimento della qualità e **l'estensione** della contaminazione
- Nel breve periodo il **numero di campionamenti**, sia spaziali sia temporali, è **aumentato** con il ricorso, spesso, a **stazioni di misura in continuo**



Il SIGR - Servizio Idrologico Geologico Regionale dispone di una rete consistente di ben **725 stazioni** con **sensori in continuo** e in **telerilevamento**

Regione Toscana SIR DATI ELABORAZIONI BIBLIOTECA AREA RISERVATA

CODICE / NOME REGIONE BACINO STAZIONI DAL AL

Toscana Automatiche SIR

SENSORI

Stazioni visualizzate » 725 (*)

ID	NOME
TOS01000025	Vara
TOS01000056	Plan della Fioba
TOS01000544	Pisa (Fac. Agraria)
TOS01000571	Vallucciole
TOS01000581	Stia
TOS01000591	Montemignaio
TOS01000601	Ortignano
TOS01000611	Camaldoli
TOS01000621	Badia Prataglia
TOS01000626	Bibbiena
TOS01000639	La Verna
TOS01000651	Salutio
TOS01000701	Capezzine
TOS01000721	Bettolle
TOS01000741	Monte S.Savino
TOS01000751	Cortona
TOS01000761	Castiglione Fiorentino

Nel dettaglio, alcuni numeri :

CODICE / NOME REGIONE BACINO STAZIONI DAL AL SENSORI

Toscana Automatiche SIR

446 stazioni termo pluviometriche

Stazioni vis

- pluviometro
- idrometro
- termometro
- anemometro
- igrometro
- barometro
- freatimetro
- mareografo
- nivometro
- radiometro

050 91 53 11 - Fax 050 91 53 24

CODICE / NOME REGIONE BACINO STAZIONI DAL AL SENSORI

Toscana Automatiche SIR

193 stazioni idrometriche

Stazioni vis

- pluviometro
- idrometro
- termometro
- anemometro
- igrometro
- barometro
- freatimetro
- mareografo
- nivometro
- radiometro

CODICE / NOME REGIONE BACINO STAZIONI DAL AL SENSORI

Toscana Automatiche SIR

139 stazioni freatimetriche

Stazioni vis

- pluviometro
- idrometro
- termometro
- anemometro
- igrometro
- barometro
- freatimetro
- mareografo
- nivometro
- radiometro

TOS1000621

TOS19000601

TOS19000602

TOS19000603 Canova

TOS19000604 S. Dionisia

TOS19000605 Ponte Zambra

TOS19000606 Lopia

TOS19000607 Piano Cortolla

TOS19000608 Piretta 14

TOS19000609 Rufone

TOS19000610 Piretta 15

TOS19000611 Tormentaila

TOS19000612 Monterufoli

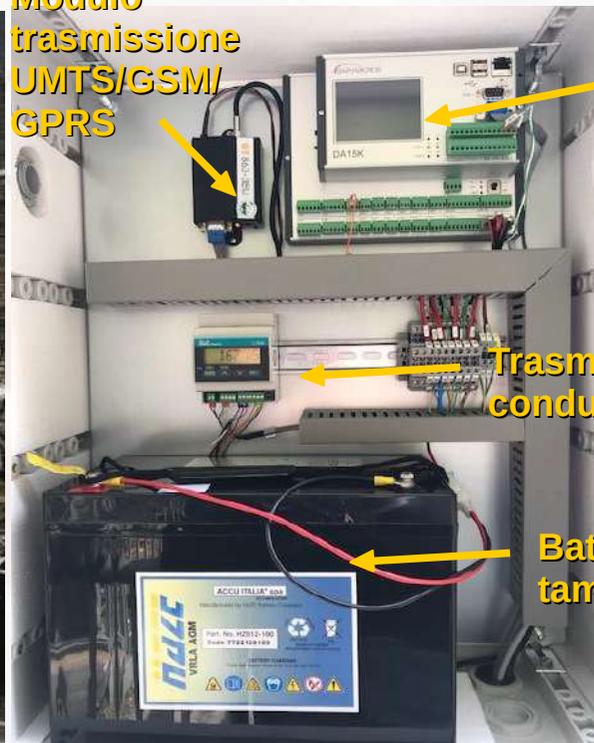
TOS19000613 Melatina bis

Stazione di Qualità ARPAT – Equi Grotte

Nome	EQUI GROTTI
Latitudine	44.16691°
Longitudine	10.15247°
Indirizzo	Sorgente di Equi
Comune	Fivizzano
Provincia	(MS) Massa Carrara



Modulo trasmissione UMTS/GSM/GPRS



Datalogger

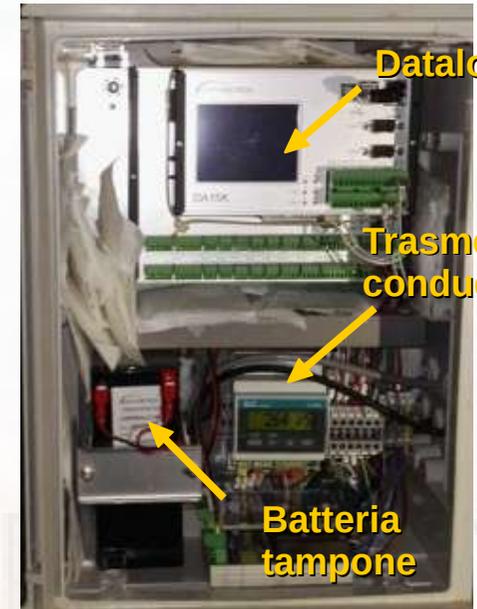
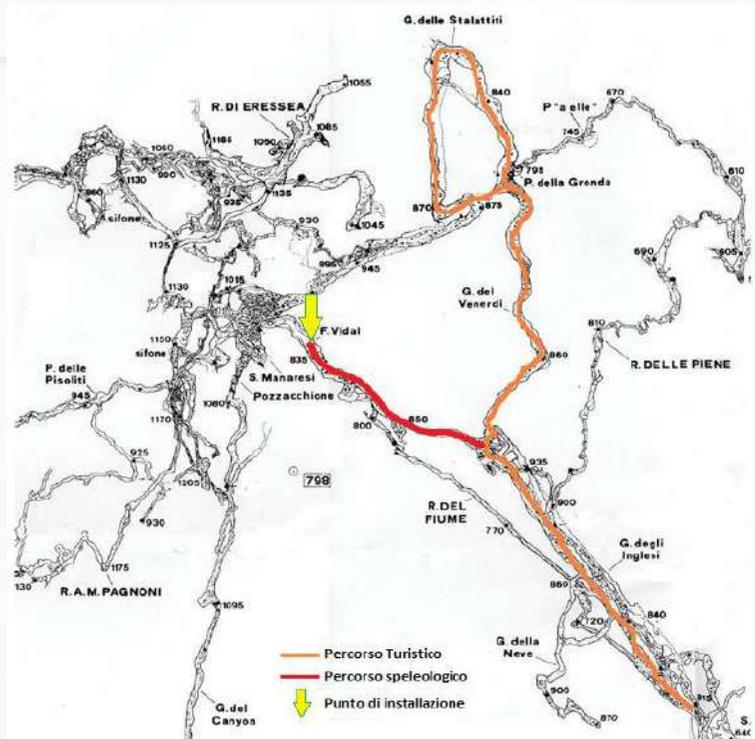
Trasmettitore conducibilità

Batteria tampone



Stazione di Qualità ARPAT - Antro del Corchia

Nome	CANALE VIDAL	
Latitudine	44.025610°	
Longitudine	10.300050°	
Indirizzo	Antro del Corchia	
Comune	Stazzema	
Provincia	(LU) Lucca	



Stazione di Qualità ARPAT - Arno a Fucecchio



Foto 15: Sbraccio e ancoraggio al ponte



Foto 16: Punto di calata

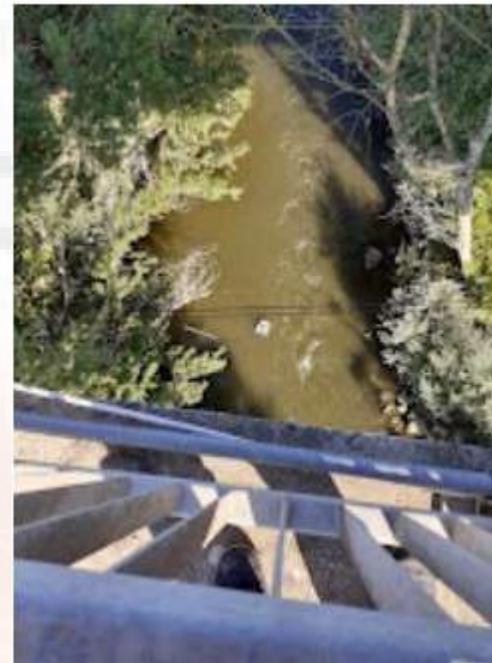
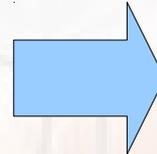


Foto 17: cabina

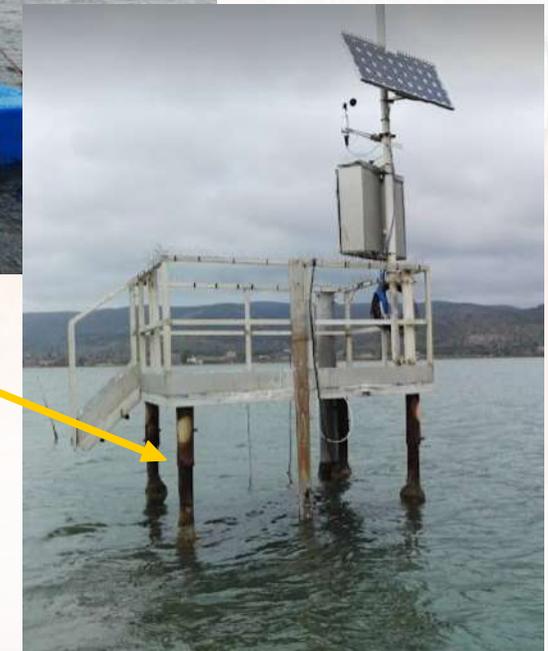


Foto 18: mappa



Installazioni per quinquennio 2021-2025 a cura di SYSTE A S.p.A. (FR)

Stazione di Qualità ARPAT - Laguna di Orbetello



Serie Temporali

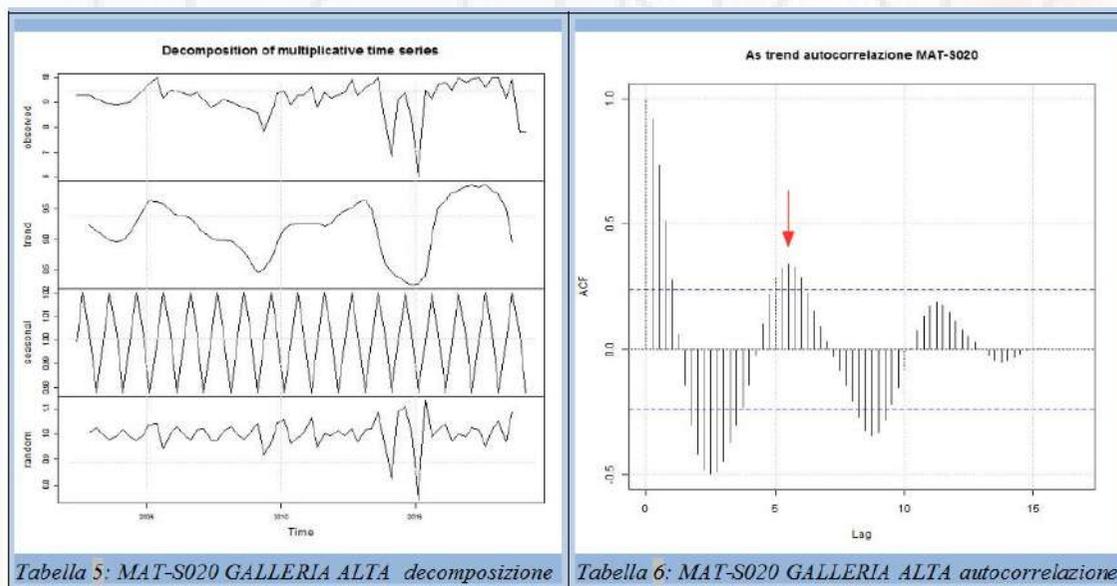
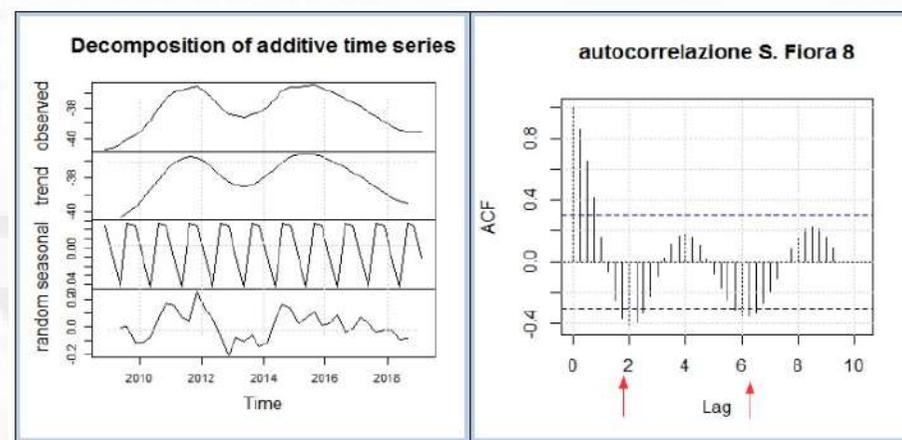
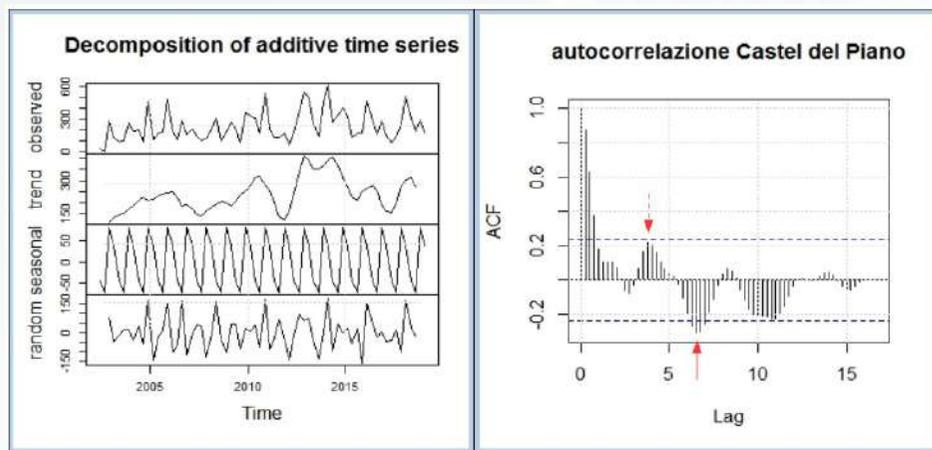
- Lo **svolgersi** nel tempo dei **monitoraggi tradizionali** uniti ai **monitoraggi in continuo** rende oggi disponibili **consistenti serie temporali** di misure che permettono, con il supporto di **strumenti statistici** e recenti **linee guida**, di trarre importanti indicazioni su:
 - Impatto** delle pressioni puntuali e diffuse
 - Correlazione** a trend climatici
 - Risposta** ad interventi di tutela della risorsa idrica



 The R Project for Statistical Computing

A Little Book of R For Time Series
Release 0.2

Monitoraggio trimestrale dei tenori di arsenico delle sorgenti dell' AMIATA al confronto delle serie temporali delle forzanti idrologiche pioggia (Castel del Piano) e livello (Santa Fiora 8)



- La **decomposizione** delle serie temporali consente di isolare le diverse componenti:
 - **trend pluriennale**
 - **stagionalità**
 - **residuale (random)**
- La funzione di **autocorrelazione** sulla componente trend consente di **quantificare** possibili **periodicità pluriennali**

La stazione GALLERIA ALTA mostra nella componente trend una notevole **ciclicità**, la cui **frequenza** sembra contrarsi e che l'analisi della autocorrelazione **quantifica in circa 6 anni di periodo**.

OMNIA – Operative Monitoring Instant Alert



ARPAT NEWS  **giornaliero**

Giovedì 02 luglio 2020

Torbidity nei corpi idrici del comprensorio Apuano

Share Tweet RSS

Messo a punto un sistema di allerta istantaneo grazie ad un progetto di tirocinio curriculare dell'Università di Firenze

Tra le azioni previste dal **Progetto Speciale Cave** vi era quello di predisporre un sistema di segnalazione degli episodi di torbidità anomala dei fiumi; tali fenomeni impattano infatti fortemente sia sulle condizioni ecologiche ambientali delle acque superficiali e sotterranee, sia sull'utilizzo per il consumo umano di sorgenti di grande rilevanza quali quelle di Torano, Canale e Cartaro.

Questa attività è stata oggetto, tra luglio 2019 e gennaio 2020, di uno specifico tirocinio del Master di II livello in Sistemi Informativi Geografici per il Monitoraggio e la Gestione del Territorio dell'Università di Firenze a cui ARPAT ha collaborato.

Nel corso del suo tirocinio, il candidato **Gian Marco De Rosa**, con estrema passione e stimolo per i colleghi, ha progettato e completato la metodologia denominata **OMNIA (Operative Monitoring Network Instant Alert)**: un sistema di allerta istantaneo che permette di

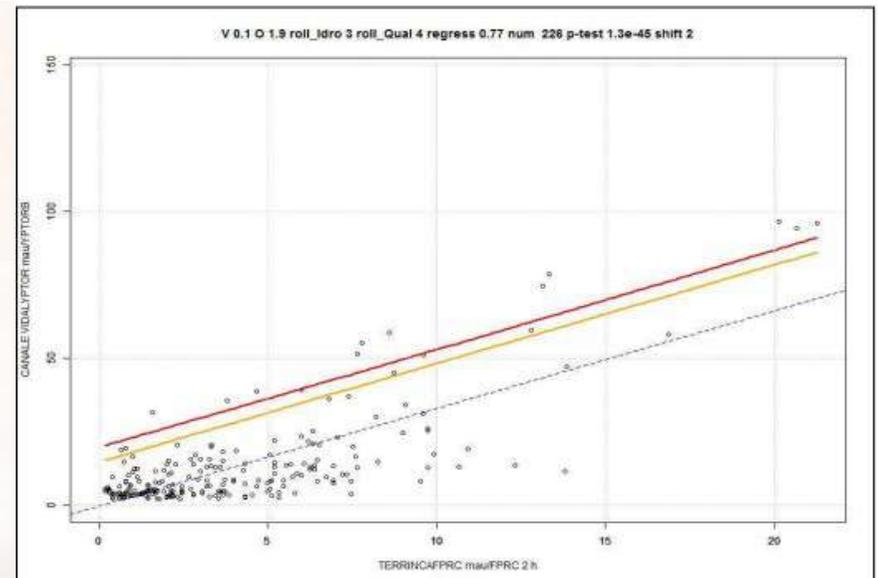
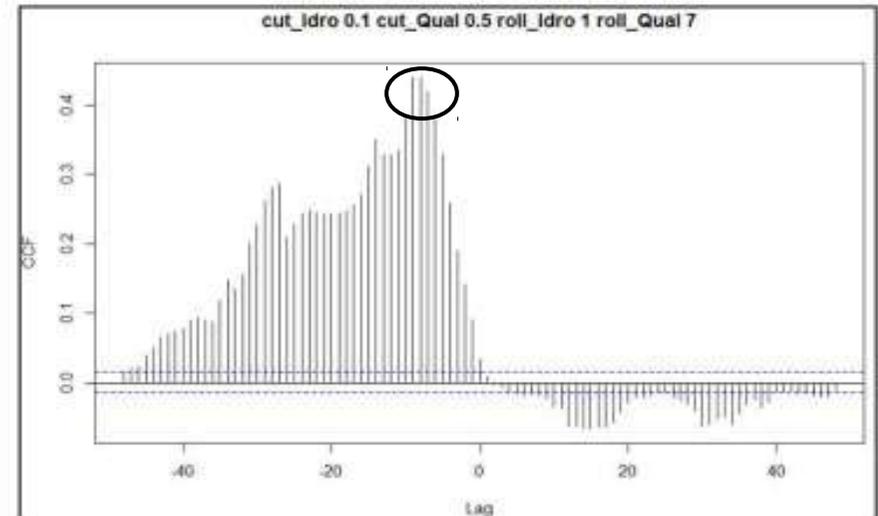


- OMNIA: perché?
 - **Rete** di rilevamento **recente** e **mancanza** di un “bianco ante operam”
 - Individuare **caratteristiche** di ogni **bacino** e **discriminare** tra **evento naturale** ed **antropico**
 - Esigenza di avere **tempi di intervento ridotti** per realizzare **campionamenti** ed **ispezioni** conseguenti
- OMNIA: cos'è?
 - Sistema **esperto** in continuo fisicamente non basato, a “**scatola nera**”
 - focus sui **superamenti** della **torbidità** attesa in **funzione** dalle **piogge** misurate
 - facilmente **leggibile** con **soglie** e **mappe interrogabili**

derosagianmarco@gmail.com

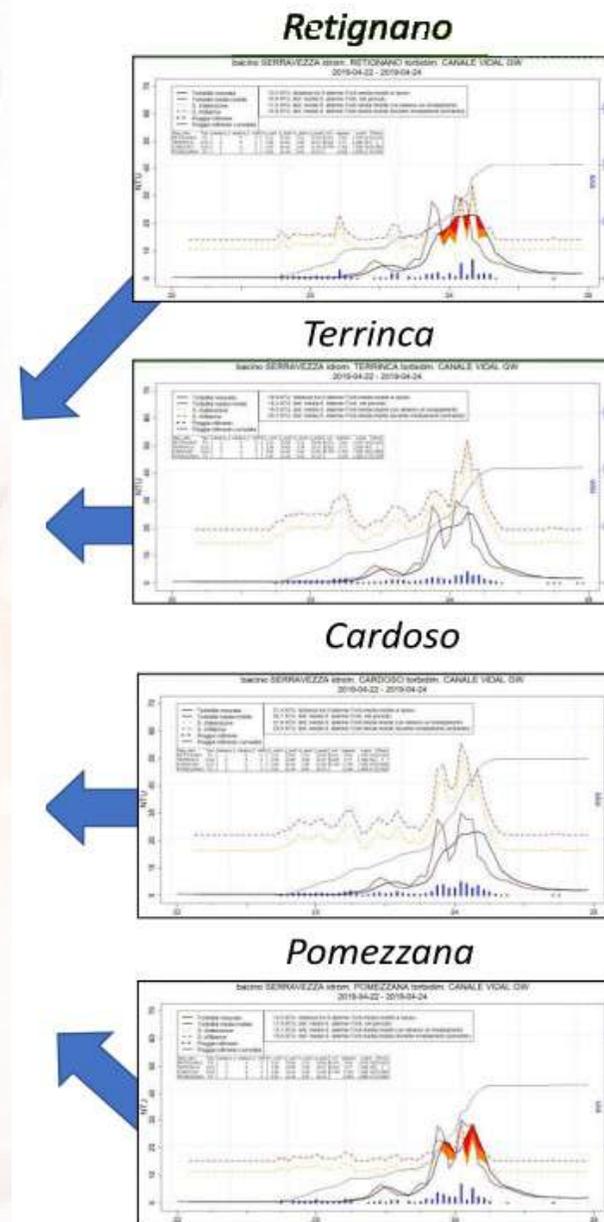
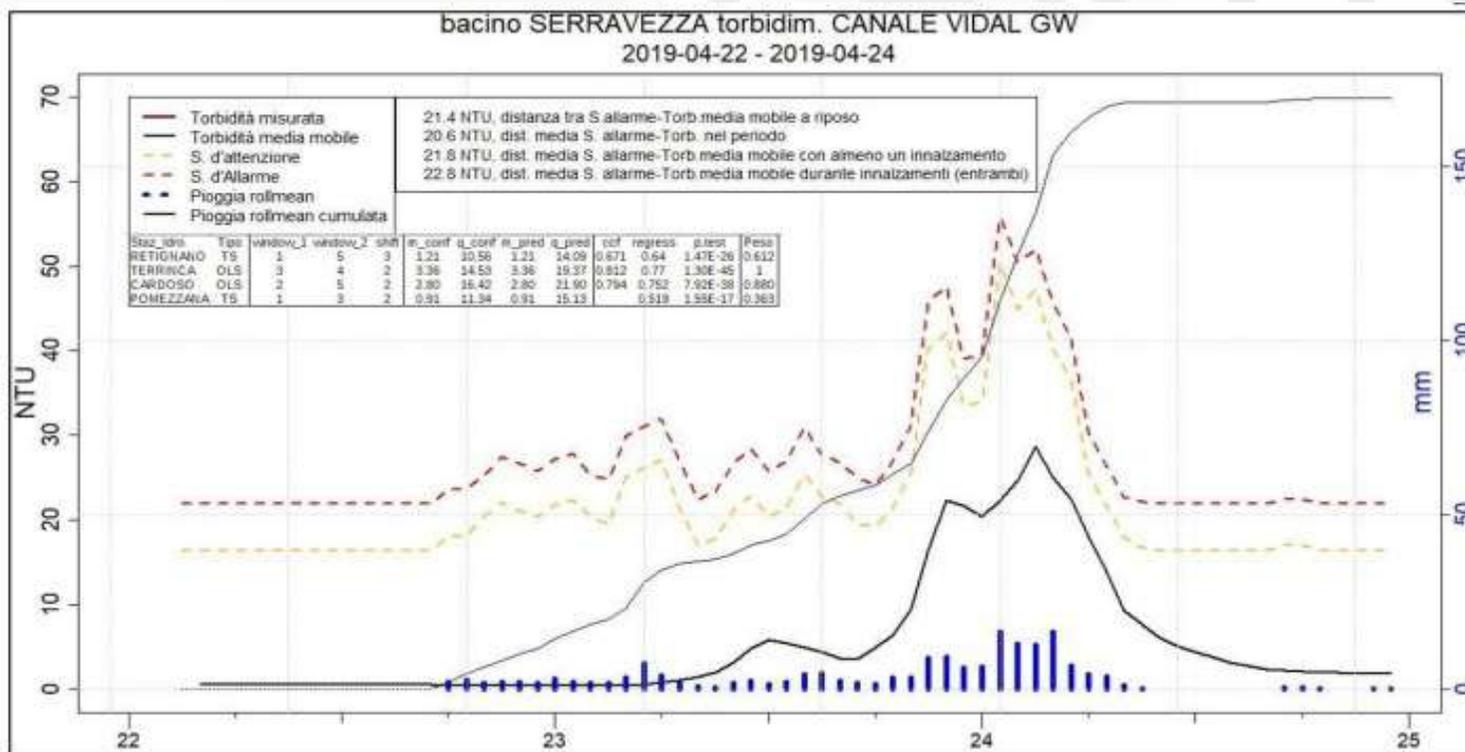
Elaborazione soglie

- **3 step:**
 - Analisi dei **correlogrammi** per la definizione dei **tempi caratteristici di ritardo**
 - Media mobile intorno al tempo di ritardo e **spostamento** per l'analisi di **regressione $Y = f(X)$**
 - **X = Precipitazione** (dipendente)
 - **Y = Torbidità** (dipendente)
 - **Soglie** derivate dai limiti di confidenza e predizione:
 - **Attenzione** (limite di confidenza media)
 - **Allarme** (limite di predizione o 95° percentile)



Restituzione sintetica

- si impiegano **più coppie torbidimetro – pluviometro**,
- estraendo **valori massimi ora per ora**,
- dei 4 parametri di interesse (precipitazione, soglia d'attenzione, soglia d'allarme, torbidità)

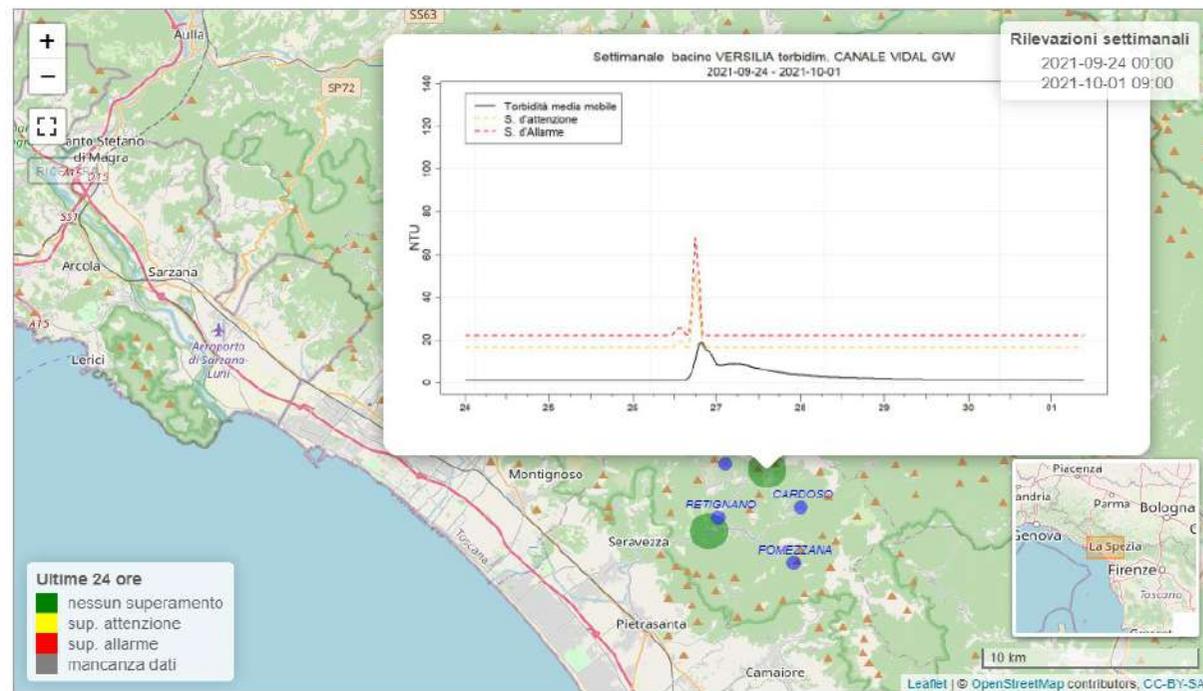


<http://sira.arp.at.toscana.it/apex2/f?p=APUANE>

Introduzione

Nel PROGETTO CAVE sono stati delineati gli obiettivi generali di conoscenza e quantificazione degli impatti dell'attività estrattiva e la rete di monitoraggio e controllo delle risorse idriche è stata implementata ed indirizzata per soddisfare questi obiettivi. I bacini interessati comprendono sia il territorio di Massa che di Lucca e comprendono i principali fiumi che delimitano l'area estrattiva apuana (Carrione, Frigido, Lucido, Seravezza oltre a Lucido, Turrice, Edron ed Acqua Bianca). Si è ritenuto necessario approfondire le conoscenze sia degli aspetti biologici, geomorfologici e chimici dei bacini individuati, affidandosi sia a rilevatori in continuo, sia a campionamenti puntuali. Le stazioni individuate per il monitoraggio in continuo sulla matrice acqua sono sette (3 in acque superficiali e 4 in sotterranee) coincidenti, in massima parte, con stazioni esistenti del monitoraggio ambientale tradizionale (MAS e MAT) condotto da ARPAT ed integrati con ulteriori punti comprendenti anche emergenze ipogee (grotte di Equi e del Corchia). Nell'implementazione della rete si è tenuto conto dell'esistenza di un monitoraggio in continuo da parte di soggetti diversi da ARPAT, quali il Gestore GAIA per il monitoraggio di portata e torbidità delle sorgenti ed il Servizio Idrologico Regionale per le stazioni idrometriche.

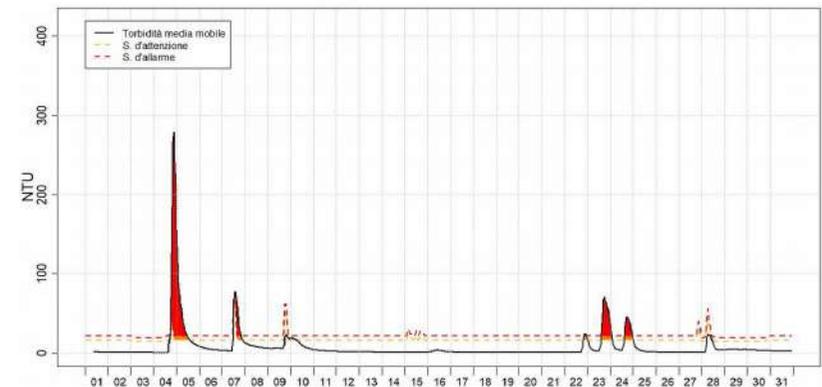
Mappa



Grafici Mensili

MESE	Equi	Carbonera	Pesa Miseglia	Cartaro	Forno	Ganevara	Vidal	Giardino	Pollaccia
2021-10	X	X	X	X	X	X	X	X	-
2021-09	X	X	X	X	X	X	X	X	-
2021-08	X	X	X	X	X	X	X	X	-
2021-07	X	X	X	X	X	X	X	-	-
2021-06	X	X	X	X	X	X	X	X	X

2019-07 Mensile bacino VERSILIA torbidim. CANALE VIDAL GW



2019-09	X	X	X	X	-	X	X	X	-
2019-08	X	X	X	X	-	X	X	-	-
2019-07	X	X	X	X	-	X	X	X	-
2019-06	X	-	-	X	-	X	X	X	-
2019-05	X	-	-	X	-	X	X	X	-

- grafici torbidità e pioggia con poche informazioni chiare

- Ultimi 7gg

- Mensili con archiviazione

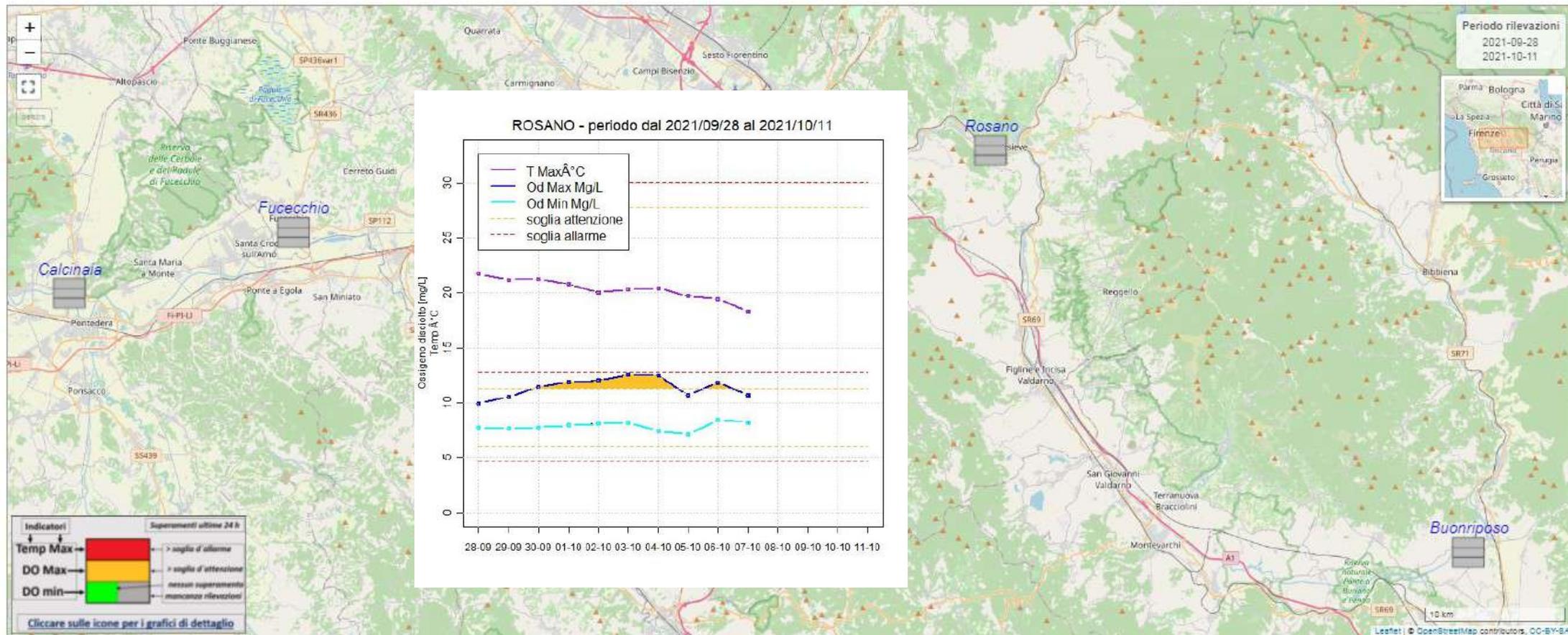
<http://sira.arpat.toscana.it/apex2/f?p=LAGUNA>



Monitoraggio annuale in continuo della LAGUNA DI ORBETELLO

<http://sira.arp.at.toscana.it/apex2/f?p=QUALARNO>

Mappa



Monitoraggio estivo in continuo del FIUME ARNO

- La **modellazione numerica** delle **acque sotterranee** implica lo sviluppo di strumenti di analisi che riproducano i **processi** che si verificano nel **sistema idrogeologico**
 - i modelli **permettono**:
 - aumentare la **conoscenza** tenendo conto dei processi naturali di rilievo;
 - consentire **analisi quantitative** di sistemi complessi;
 - testare **scenari multipli** e guidare il **processo decisionale** aiutando a verificare l'efficienza dei sistemi

- Più in generale, un “modello” di una falda acquifera è una rappresentazione **semplificata** di un sistema naturale:
 - Modelli **Concettuali**: rappresentazione mentale della geologia e idrogeologia del sito come insieme di unita' continue e in relazione tra loro
 - Modelli **Fisici**: lisimetri, colonne, serbatoi, ...
 - Modelli **Matematici**:
 - Modelli Analitici
 - Modelli Numerici: MODFLOW, MT3D

Equazione bilancio **ANALITICA FLUSSO**:

- le variazioni di velocità del flusso darciano (K) in ingresso ed uscita da una sezione elementare (A) del mezzo acquifero, devono corrispondere, nel tempo, all'immagazzinamento interno (S) o a scambi occulti (pozzi – ricariche) (W).

$$S \frac{\partial h}{\partial t} \pm W = A \left\{ \frac{\partial (K \frac{\partial h}{\partial x})}{\partial x} \right\} = L^3 T^{-1}$$

Equazione bilancio **ANALITICA TRASPORTO**:

- le variazioni del flusso di massa, cioè concentrazione C per velocità del flusso darciano K in ingresso ed uscita da una sezione elementare A del mezzo acquifero, corrispondono, nel tempo, a variazioni della concentrazione interna. o a scambi di massa M occulti.

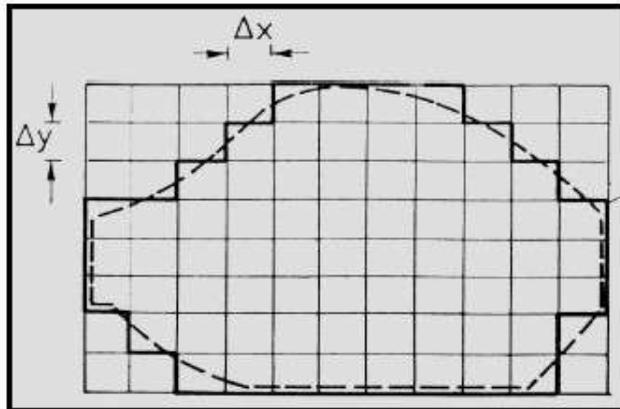
$$\frac{\partial C}{\partial t} \pm M = \left\{ \frac{\partial C (K \frac{\partial h}{\partial x})}{\partial x} \right\} = ML^3 T^{-1}$$

Per la **discretizzazione** del sistema, necessaria alla soluzione del modello numerico :

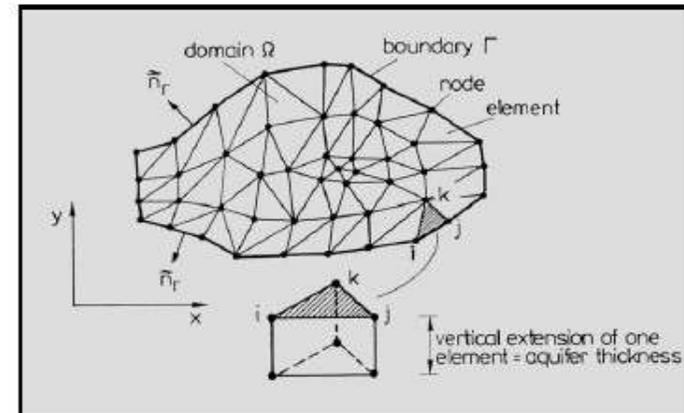
Il metodo alle **DIFFERENZE FINITE** impone una semplice griglia rettangolare, variamente spaziata.

Il metodo agli **ELEMENTI FINITI** permette definizioni geometriche più accurate costruendo, per nodi, elementi di qualsiasi forma.

METODO ALLE DIFFERENZE FINITE



METODO AGLI ELEMENTI FINITI

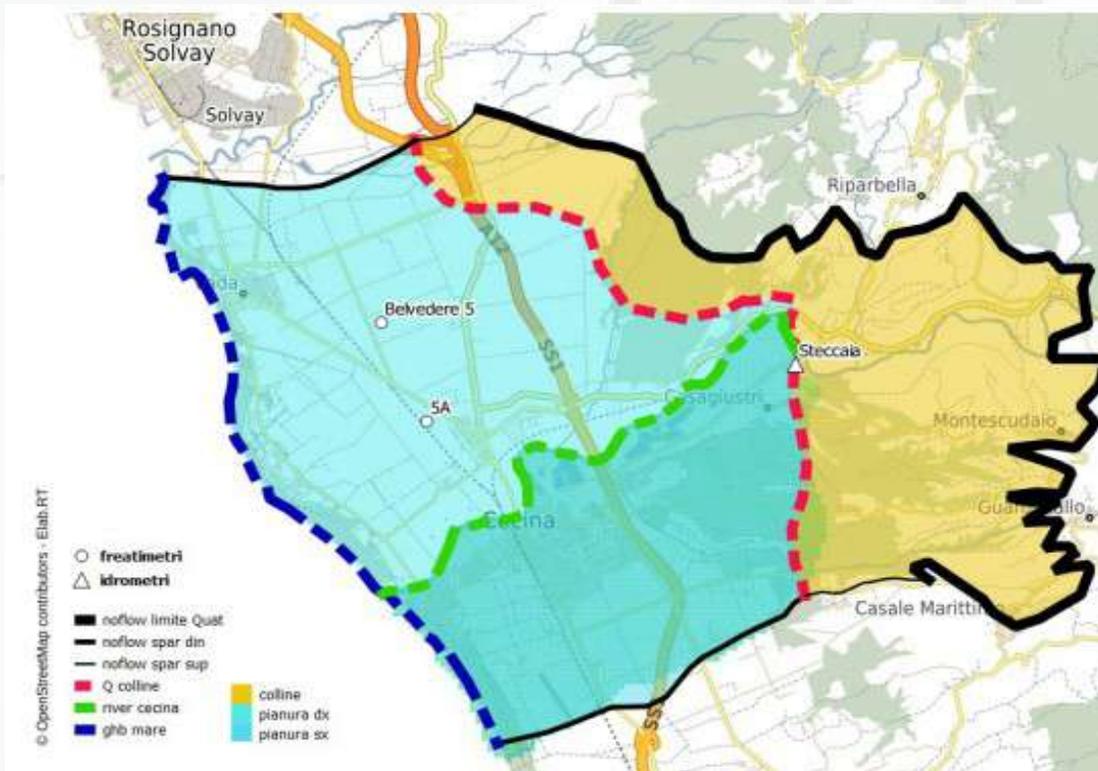


NB La “**discretizzazione**” cioè la suddivisione del modello in micro domini di calcolo ha un influenza diretta sulla tecnica di soluzione numerica condizionandone:

- la velocità di esecuzione
- la precisione

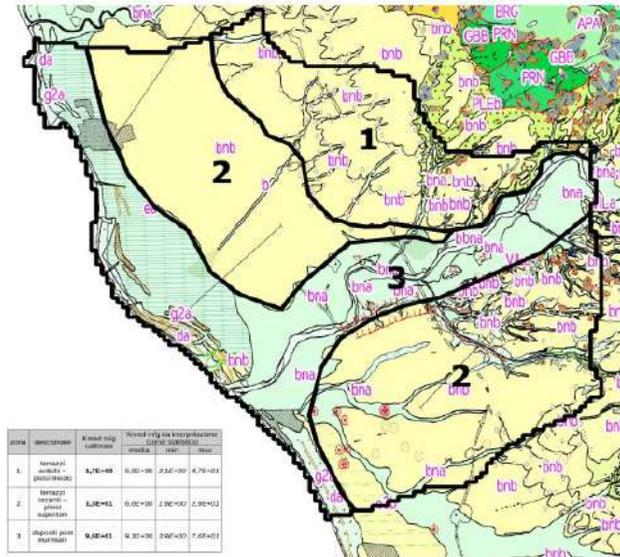
Modello concettuale e condizioni al contorno

- **condizioni di non flusso** in corrispondenza di spartiacque sotterranei a nord ed a sud e in corrispondenza del limite di affioramento del sistema acquifero corrispondente alle unità sintemiche quaternarie
- **condizione di flusso imposto** in corrispondenza della scarpata erosiva che separa i due domini delle aree di pianura e collinari



- **condizioni di carico imposto** date dal fiume Cecina, il cui profilo idrometrico è derivabile dall'idrometro SIGR della Steccaia ed il cui flusso di scambio, dipendente dal carico, è mediato da spessori della copertura del sistema acquifero progressivamente crescenti verso la foce; condizioni di carico imposto date dal mare
- **condizioni di non flusso** di raccordo lungo spartiacque superficiale

Distribuzione per zona e calibrazione manuale della conducibilità idraulica media



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

Statistica residui dopo calibrazione manuale

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

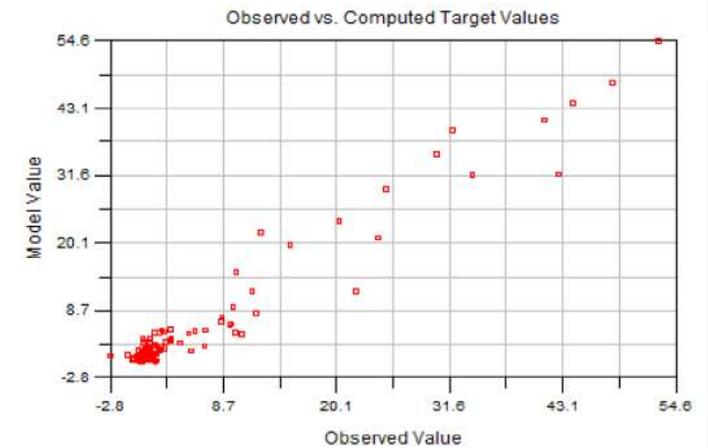
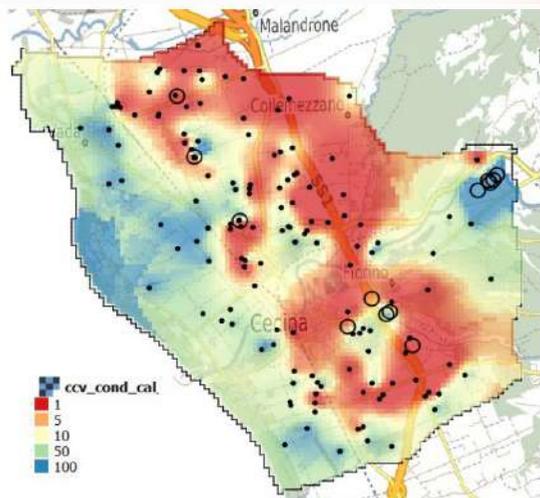


Grafico osservato calcolato

Conducibilità media calibrata con PEST



Statistica residui dopo PEST (pilot points)

Residual Mean	0,081383
Absolute Residual Mean	0,911651
Residual Std. Deviation	1,576421
Sum of Squares	249,172772
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

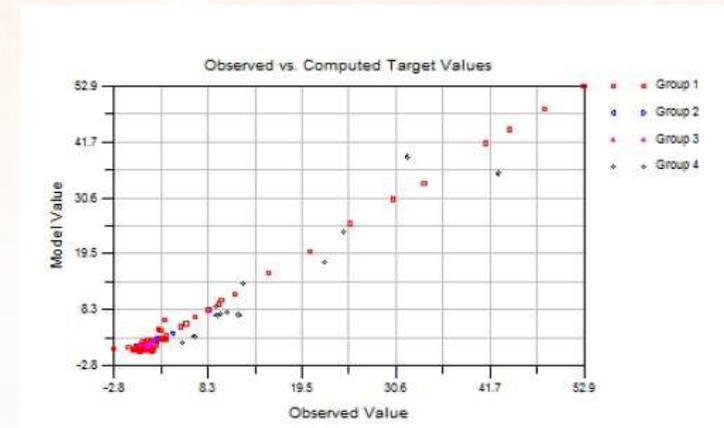
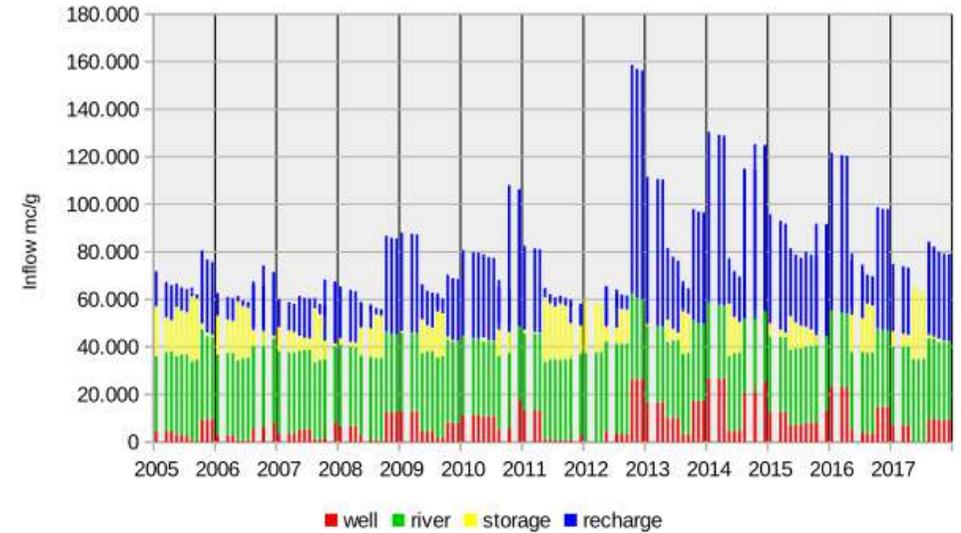
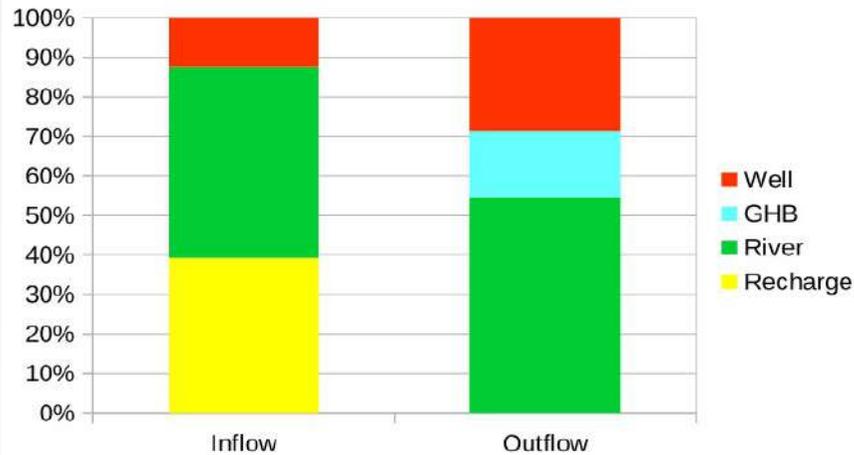


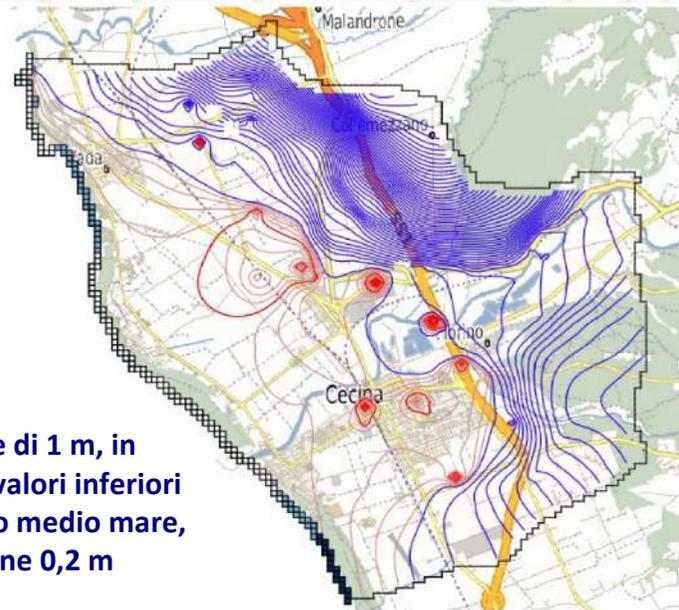
Grafico osservato calcolato

Bilancio Idrico del Modello Stazionario

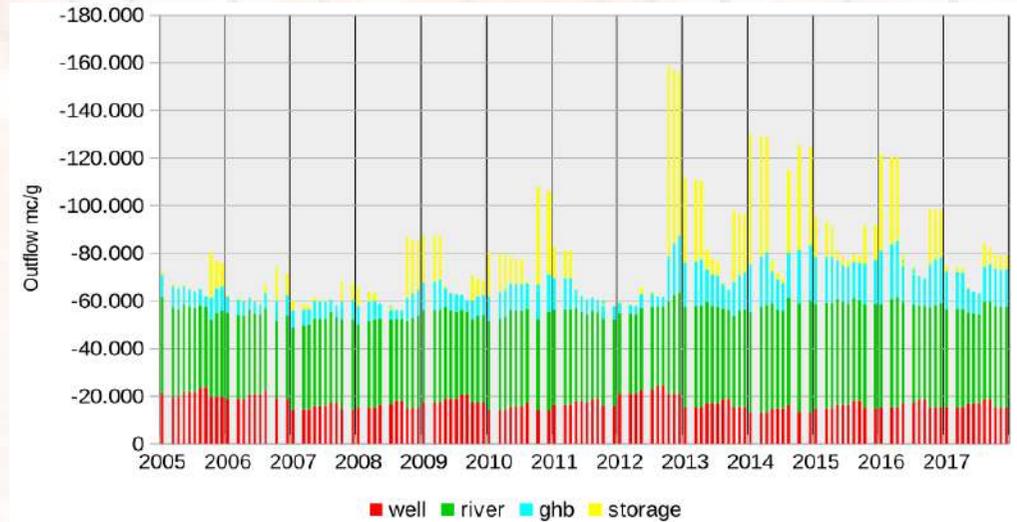


Afflussi del Modello Transitorio

Mapa piezometrica relativa all'episodio critico del periodo di fine settembre 2012



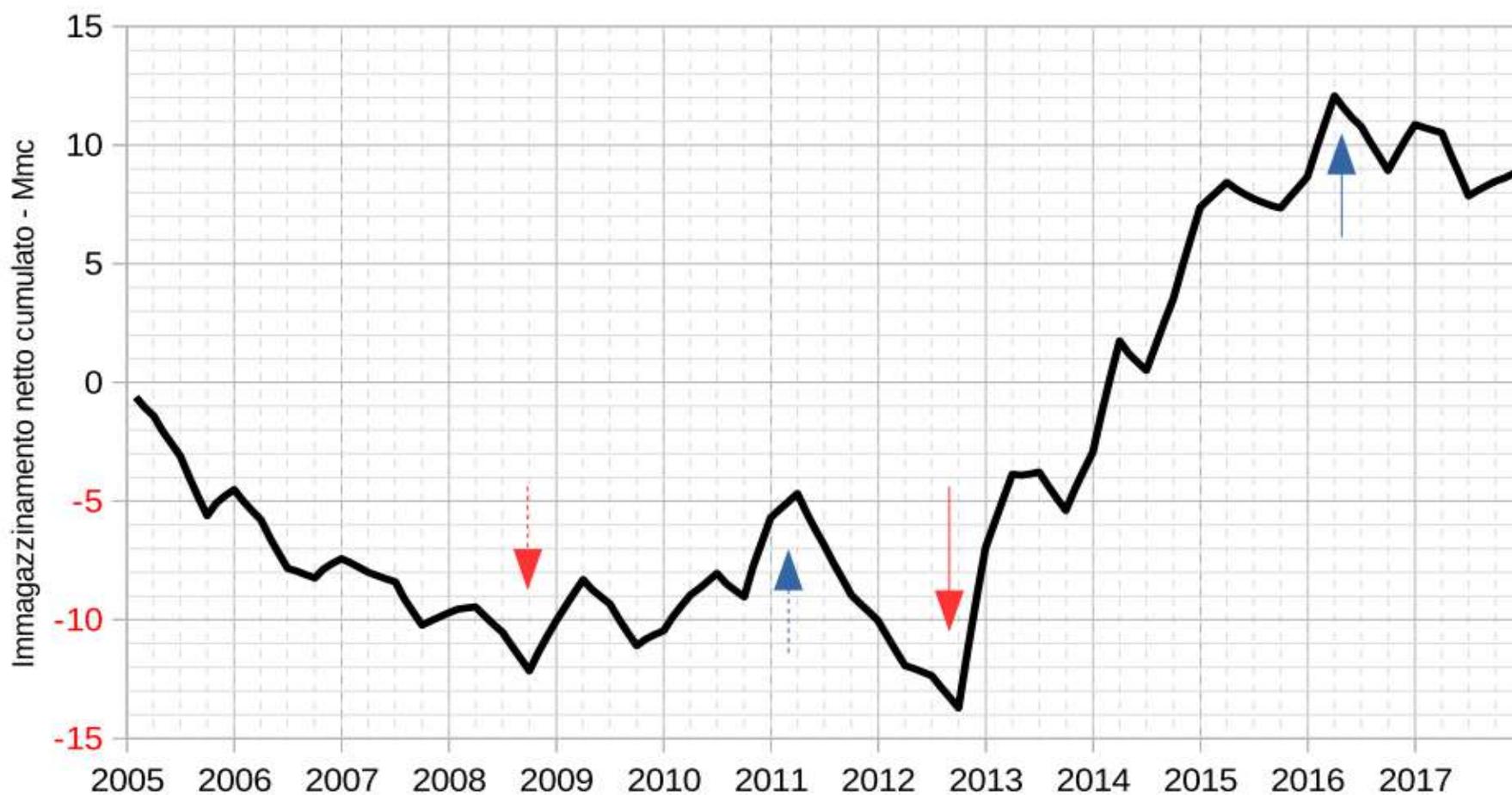
Isopieze di 1 m, in rosso i valori inferiori al livello medio mare, tratto fine 0,2 m

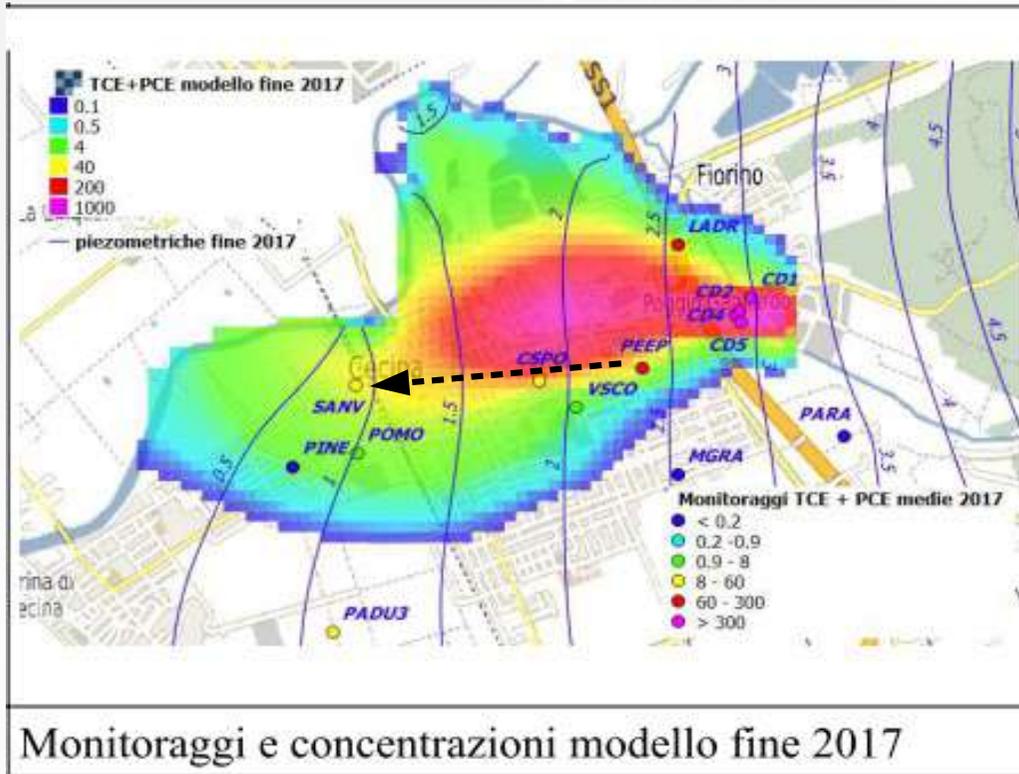


Deflussi del Modello Transitorio

ANALISI DEI RISULTATI

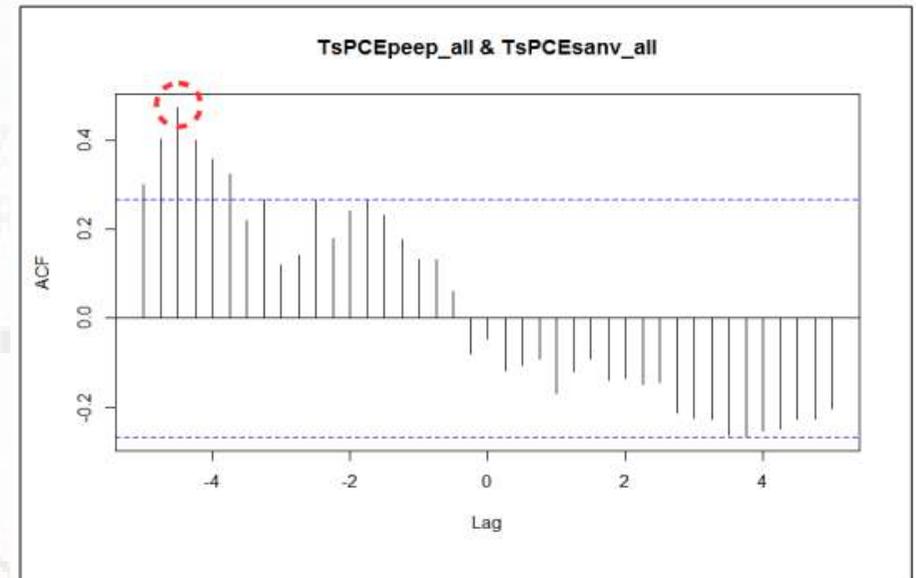
Idrogramma dell'immagazzinamento netto cumulato



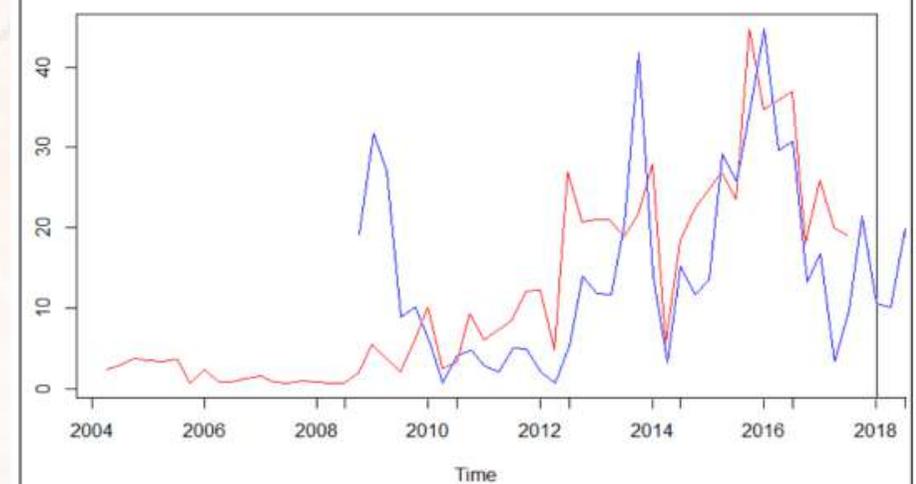


Monitoraggi e concentrazioni modello fine 2017

- Per i due pozzi PEEP e SANV è stata condotta una analisi tramite correlogramma per la ricerca di un possibile tempo di ritardo tra le due serie, la prima (PEEP) prossima alla sorgente la seconda distante 2 km nella direzione del deflusso di falda. I risultati indicano un tempo di 4,5 anni.



Corelogramma: PEEP precede di 4,5 anni SANV



Shift di 4,5 anni della serie PEEP (rosso) sulla serie SANV (blu)

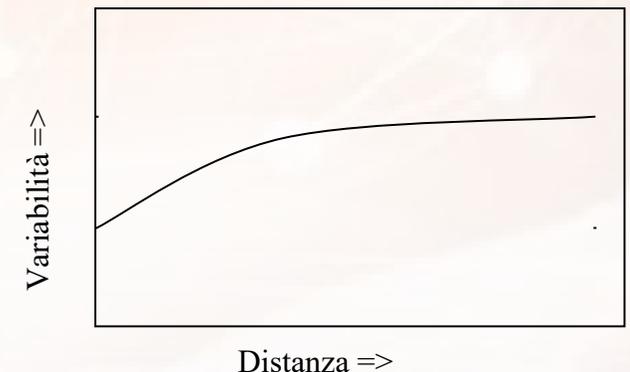
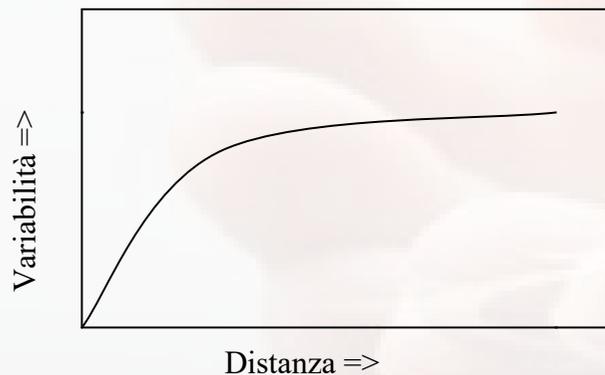
Finalità della **Geostatistica** è lo studio dei **fenomeni naturali** che si sviluppano su **base spaziale** condotto attraverso la **conoscenza**, in un **limitato numero di punti**, dei valori assunti dalla variabile o dalle variabili che descrivono il fenomeno

Conoscendo il **valore** di una grandezza in **alcuni punti** nello spazio (per esempio il livello di falda o la concentrazione di un contaminante nei pozzi), possiamo determinare il **valore** della grandezza, con associato l'**errore**, in **altri punti** per i quali non esistono o non sono possibili misure

Correlazione spaziale: osservazioni effettuate su punti vicini presentano una minore *variabilità* rispetto ad osservazioni effettuate tra punti distanti. *Le cose più vicine sono più simili rispetto alle cose più lontane*

La variabilità viene valutata con lo strumento del **semivariogramma** che riporta il grado di variabilità delle osservazioni a distanze crescenti.

L'interpolazione spaziale del Kriging si basa proprio sull'autocorrelazione della grandezza. Il valore incognito in un punto viene calcolato con una media pesata dei valori noti e per determinare i “pesi” che vengono dati alle misure note si usa il **semivariogramma**, un grafico che espone, sia in maniera qualitativa che quantitativa, il grado di dipendenza spaziale.



- Le tre **categorie di monitoraggio** introdotte dalla **Direttiva Quadro** consentono un **approccio graduale e misurato** alle diverse **necessità di conoscenza e protezione dei corpi idrici**
- Il **monitoraggio in continuo** è uno **strumento** fondamentale nel **monitoraggio di indagine** fornendo, nel **breve periodo**, grande **disponibilità di misure** rendendo così **statisticamente apprezzabili** pur piccole variazioni tuttavia fondamentali per lo studio dei processi
 - Ulteriori strumenti derivati dalla grande disponibilità dei dati ed acquisizione in tempo reale sono **l'analisi delle serie temporali** e la **costruzione di soglie d'intervento** (attenzione, allarme)
- La **modellazione numerica** rappresenta altresì uno **strumento** estremamente **potente**: per l'incremento della **conoscenza**, le **valutazioni quantitative** ed i **confronti** tra più **scenari**
- La **modellazione geostatistica**, infine, è una **verifica** importante della **effettiva "parentela" e continuità spaziale** del campo di valori misurati, da cui discendono **preziosi risultati** (delineazione **pennacchi**, relazioni monte valle, **ricerca fonti**)

Grazie dell'attenzione

Grotta Giusti – Lago Limbo
Foto F. Mantelli