

# I MODELLI DI FLUSSO E TRASPORTO NELLA PROGETTAZIONE DEGLI IMPIANTI GEOTERMICI A CIRCUITO APERTO

**CORSO ONLINE ORGANIZZATO DALL'  
ORDINE DEI GEOLOGI DEL PIEMONTE**

04 MAGGIO 2021  
ORE 09:00 – 13:00

RELATORE:

***DOTT. GEOL. GABRIELE BERNAGOZZI***  
*RESPONSABILE DELL'AREA IDROGEOLOGIA DI ENSER SRL*

***ENSER SRL - VIALE ALFREDO BACCARINI, 29, 48018 FAENZA RA***

## Argomenti trattati

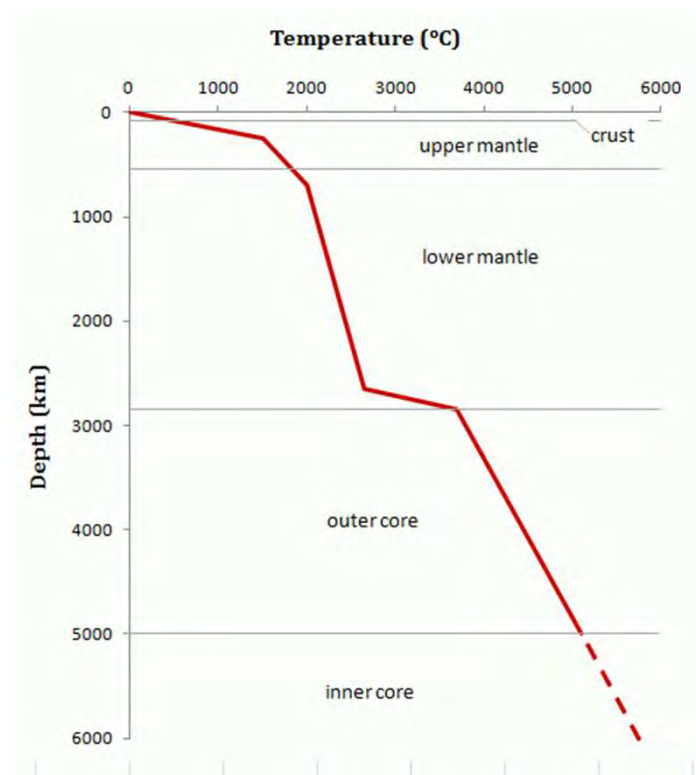
- **Geotermia tradizionale** e geotermia a **bassa entalpia** per riscaldamento e raffrescamento di edifici
- Cos'è una pompa di calore e come funziona (cenni)
- Pompe di calore ad aria e pompe di calore geotermiche
- Geotermia a **circuito chiuso** e a **circuito aperto**
- **Aspetti amministrativi** della geotermia a circuito aperto
- **MODFLOW**, cos'è, come funziona, come si installa, come **muovere i primi passi**
- Schema concettuale di un impianto geotermico a circuito aperto
- Modello Modflow semplificato per capire il problema delle variazioni di carico idraulico e cenni sul **MODPATH**
- **MT3DMS** per il trasporto di calore
- Caso reale di impianto con un pozzo di presa e uno di resa
- Caso reale di impianti con 5 pozzi di presa e 5 pozzi di resa

### OBIETTIVO

Cercare di far capire il **ruolo del geologo**, nella sua specializzazione **idrogeologica**, nell'ambito della progettazione di un impianto geotermico a circuito aperto **mostrando i passi che deve compiere** per raggiungere il risultato

# La geotermia tradizionale

L'energia geotermica è l'energia generata sfruttando il calore naturale del pianeta Terra.



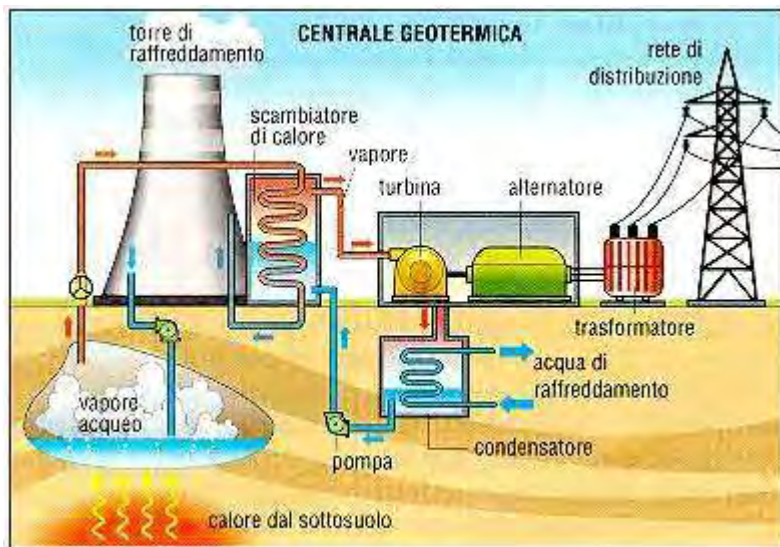
Il gradiente medio nella crosta terrestre (misurabile dai sondaggi) è di circa 25 °C per km.



Misura più profonda: Penisola di Kola, 12262 m di profondità.  $T=180\text{ °C}$

<https://www.e-education.psu.edu/eme807/node/712>

# La geotermia tradizionale



Impianto di Larderello



## Curiosità: primo esempio conosciuto di uso della geotermia



La più antica piscina conosciuta alimentata da una sorgente calda, costruita durante la dinastia Qin nel III secolo a.C.

[https://it.wikipedia.org/wiki/Energia\\_geotermica](https://it.wikipedia.org/wiki/Energia_geotermica)

## La pompa di calore ad aria

La geotermia a bassa entalpia non sfrutta il calore del sottosuolo ma la sua inerzia termica.

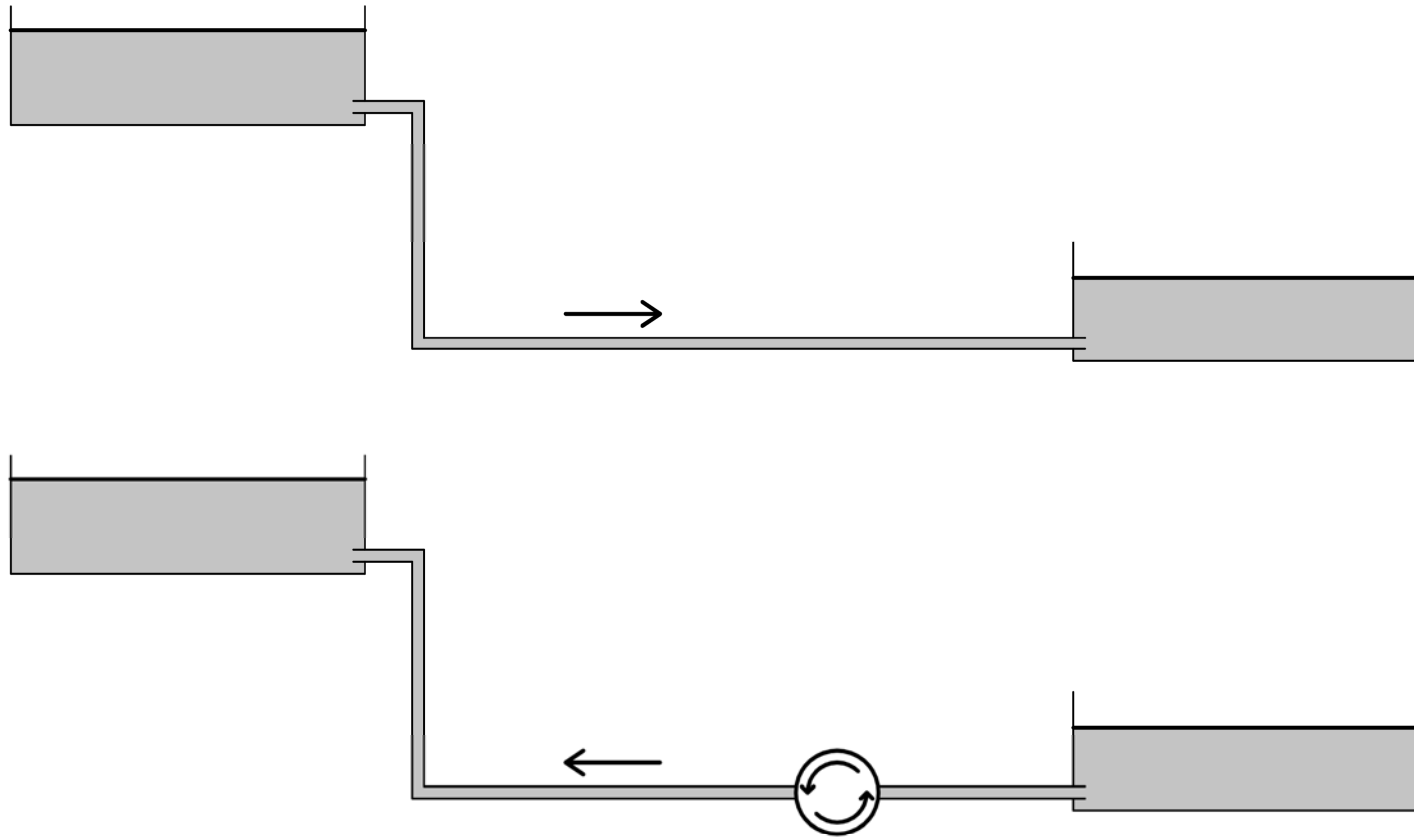
Lo scambio di calore viene sempre eseguito mediante una Pompa di Calore



Concettualmente il funzionamento è analogo alle pompe di calore ad aria

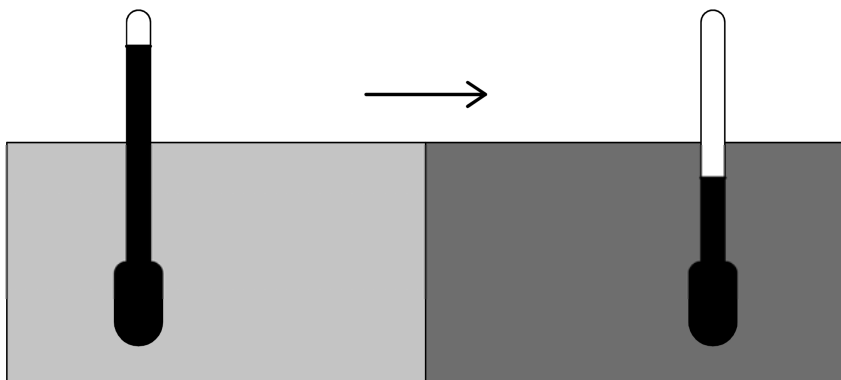


## Perché «pompa di calore?»

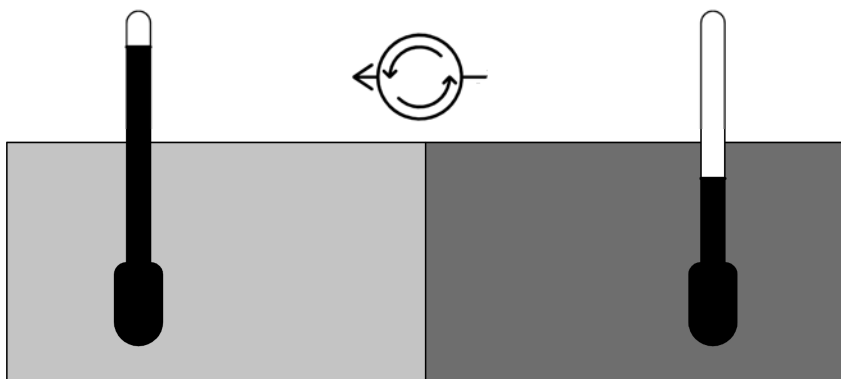


L'acqua spontaneamente si sposta dall'alto verso il basso. Per spostarla dal basso verso l'alto occorre una pompa

## Perché «pompa di calore?»



Il corpo caldo diventa un po' più freddo mentre quello freddo si scalda un po'. Questo è ciò che capita **naturalmente**.



Con la pompa di calore **il calore viene pompato** dal corpo più freddo verso quello più caldo:

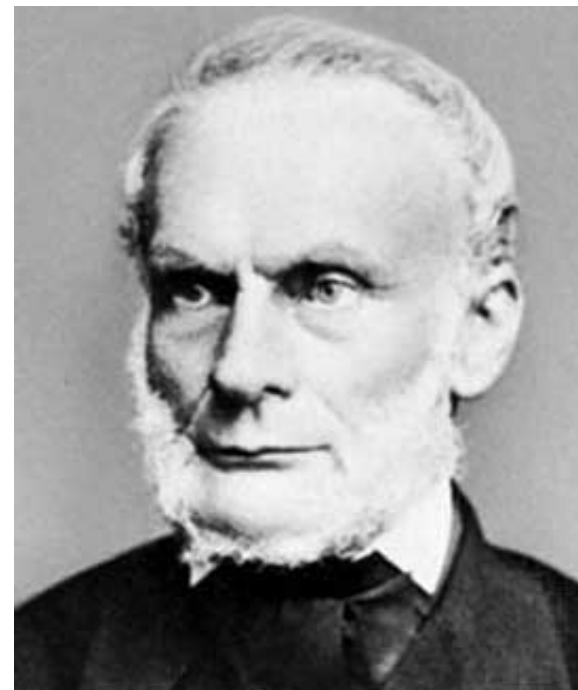
- Il corpo **freddo** diviene ancora **più freddo**;
- Il corpo **caldo** diventa ancora **più caldo**.

## La pompa di calore ad aria

E' impossibile realizzare una trasformazione termodinamica il cui unico risultato sia quello di far passare del calore da una sorgente a temperatura inferiore a una a temperatura superiore.

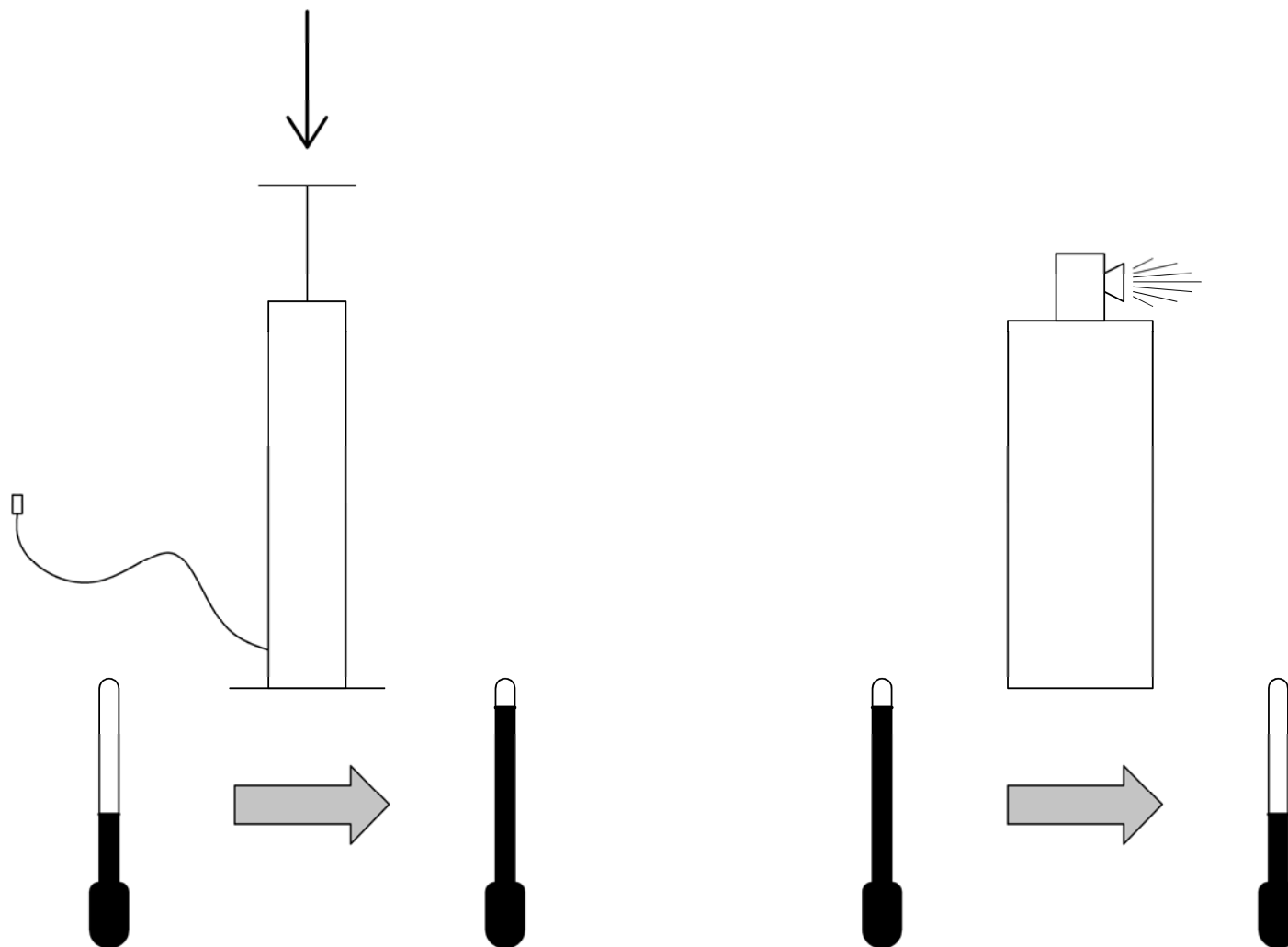
In pratica, per trasferire calore da un corpo più freddo ad un corpo più caldo è necessario che ci sia un lavoro esterno al sistema.

Il frigorifero per funzionare deve essere attaccato alla corrente elettrica. Attraverso il compressore **il frigorifero pompa il calore** dall'interno (che è freddo e diventa più freddo) all'esterno (dove è più caldo e diventa ancora più caldo)



*Rudolf Clausius*

## La pompa di calore ad aria



## La pompa di calore – principio di funzionamento



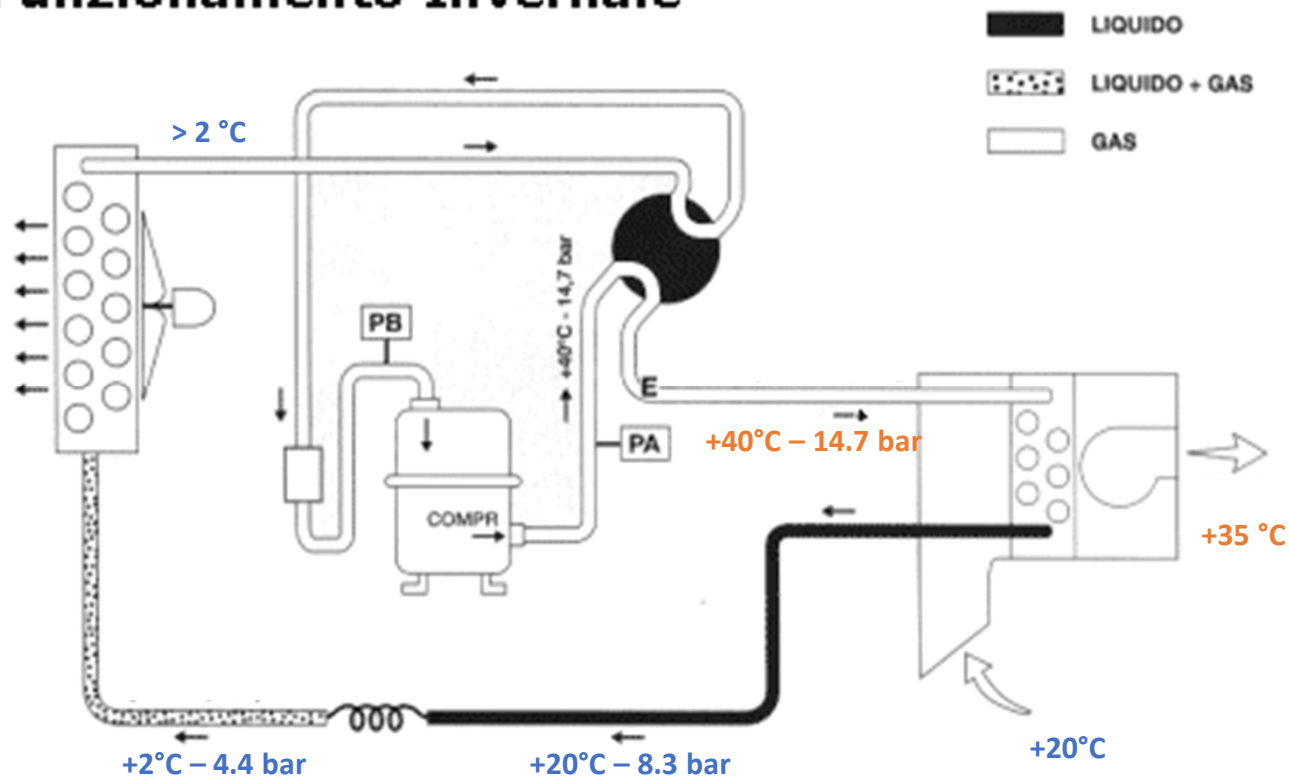
<https://www.gruppofondarioitalia.it/wp-content/uploads/2018/07/pompa-di-calore-funzionamento-e-costi.jpg>

La pompa di calore, utilizzando un lavoro ( $W$ ) prodotto dal compressore, riesce a spostare il calore dalla sorgente fredda alla sorgente calda, facendolo muovere in senso inverso rispetto a come andrebbe spontaneamente

# La pompa di calore ad aria – ciclo invernale

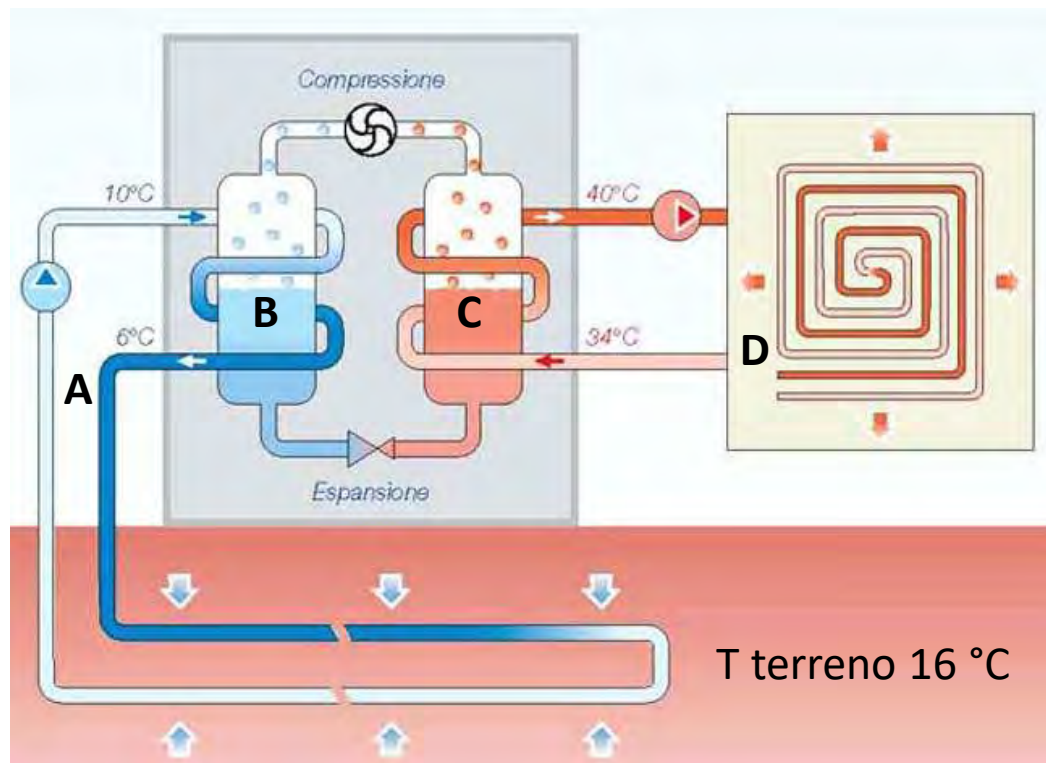
## Funzionamento Invernale

All'esterno la temperatura è  $> 2^{\circ}\text{C}$



<http://web.tiscali.it/rtrctssic-wolit/assisten/pompacal.htm>

## La pompa di calore geotermica – ciclo invernale



<https://www.cosvig.it/wp-content/uploads/2018/10/image-1292-2.jpg>

$$t_D > t_A$$

Quindi il calore naturalmente non può passare da A a B.  
Però in virtù del lavoro svolto dal compressore:

$$t_B < t_A$$

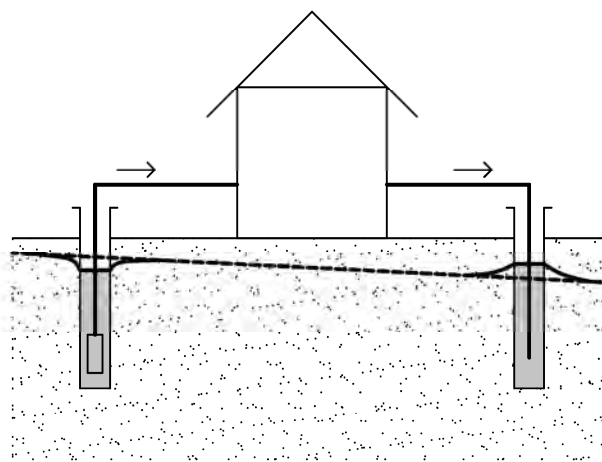
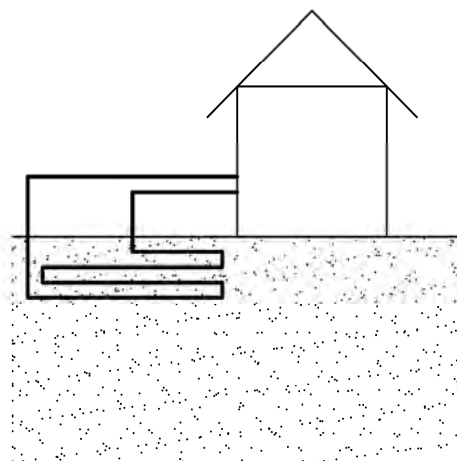
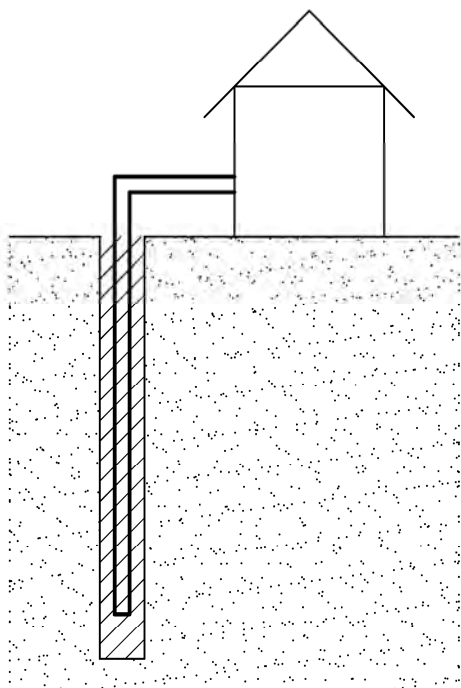
Quindi il calore può passare da A a B  
Sempre per il lavoro svolto dal compressore:

$$t_C > t_D$$

Quindi il calore può passare da C a D.

Alla fine quindi il calore viene «pompato» da A a D

## Impianti a circuito aperto e a circuito chiuso



## La pompa di calore geotermica – circuito chiuso



Circuito chiuso usando fori di sondaggio (100 – 130 m)

## La pompa di calore geotermica – circuito chiuso



Circuito chiuso sfruttando i pali di fondazione



## La pompa di calore geotermica – circuito chiuso

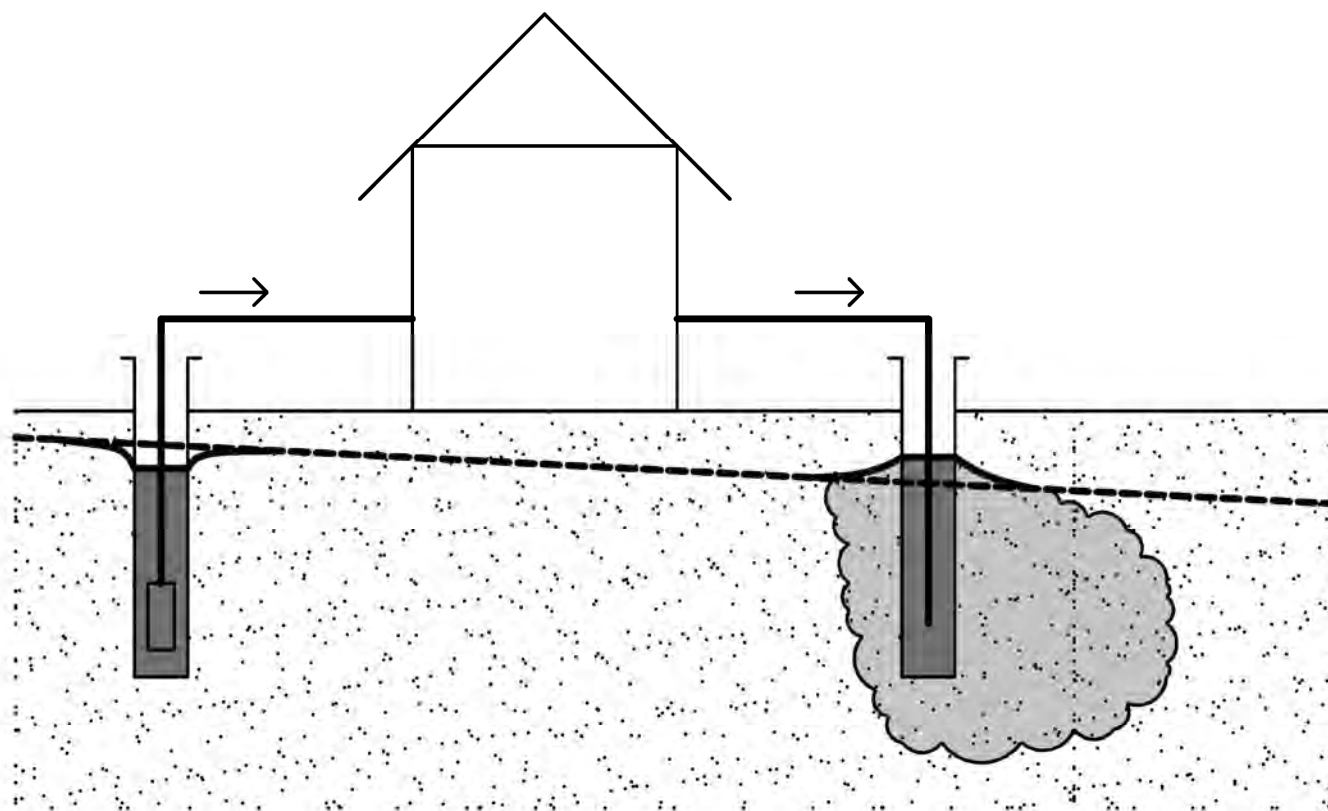


## La pompa di calore geotermica – circuito chiuso

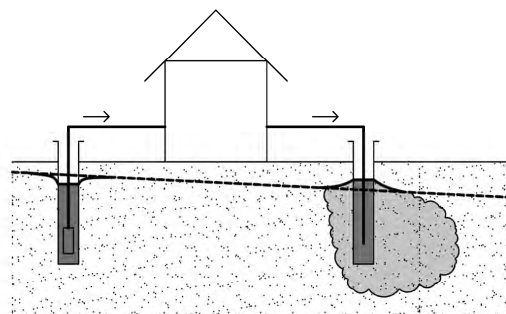


<https://www.rcinews.it/files/2015/07/GEOT.jpg>

## La pompa di calore geotermica – circuito aperto



# La pompa di calore geotermica – circuito aperto



## Occorre estrarre acqua dalla falda

- **Tecnico:** è possibile estrarre acqua in quantità sufficiente? Quali saranno gli abbassamenti  $\Delta h$  di falda in seguito al pompaggio? Esiste il rischio di cedimenti?
- **Amministrativo:** è consentito estrarre acqua? Da quali falde? Con quale portata massima?

## Occorre immettere acqua in falda con $\Delta T$

- **Tecnico:** il corpo acquifero è in grado di assorbire acqua? L'acqua immessa cortocircuiterà? Quanto si innalzerà la falda nell'area di immissione? Si allagheranno degli interrati esistenti?
- **Amministrativo:** è consentito immettere acqua? In quali falde? Che caratteristiche deve avere l'acqua per essere immessa? Qual è il massimo  $\Delta T$  consentito in estate e in inverno? Si disturberanno impianti esistenti a valle? E' possibile scaricare in un corpo idrico superficiale?

# Impianti a circuito aperto - Lombardia

DELIBERAZIONE N° X / 6203 Seduta del 08/02/2017

Visto .....

Delibera:

- 1 - di approvare le modalità realizzative i contenuti delle indagini preventive previste dalla l.r. 38/2015, ai fini del rilascio dell'autorizzazione allo scarico in falda di acque sotterranee prelevate per scambio termico tramite pompa di calore, di cui all'allegato allegato al presente provvedimento che ne costituisce parte integrante e sostanziale;
- 2 - di dare atto che **l'allegato costituisce guida tecnica per predisporre le relazioni da allegare all'istanza di autorizzazione alla reimmissione nelle acque sotterranee delle medesime prelevate per scambio termico in impianti a pompa di calore** e nel contempo costituisce riferimento tecnicoamministrativo per l'Autorità competente al rilascio dell'autorizzazione di cui all'art. 104, comma 2, del d. lgs. 152/2006;
- 3 - .....

d.g.r. 6203 dell'8 febbraio 2017 che approva i contenuti delle indagini preventive ai fini del rilascio dell'autorizzazione allo scarico in falda prelevate per scambio termico pubblicata sul B.U.R.L. S.O. n. 7 del 15/2/2017 (pagg. da 17 a 25).

## Impianti a circuito aperto - Lombardia

Idea di base:

- La normativa statale di norma vieta lo scarico diretto nel sottosuolo o nelle acque di falda ma per le acque prelevate per «scambio termico» è possibile autorizzare lo scarico in deroga

Per consentire questo scarico

- a supporto della richiesta il richiedente deve svolgere specifiche indagini;
- l'indagine è a carico del richiedente e deve essere redatta da un professionista abilitato;
- tanto il prelievo quanto la reimmissione devono avvenire nella **«prima falda»**;
- devono essere eseguite indagini chimiche per garantire che **le acque prelevate siano identiche a quelle immesse** e deve essere definito un  **$\Delta T$  massimo**.

L'impianto della pompa di calore deve essere costruito in modo tale che l'acqua di falda che circola non subisca alcuna contaminazione con altri fluidi circolanti nell'impianto, in modo che sia garantita «l'invarianza chimica delle acque reimmesse rispetto a quelle prelevate».

## Impianti a circuito aperto - Lombardia

La portata d'acqua emunta dall'impianto è funzione della potenza termica/frigorifera necessaria alla climatizzazione dell'edificio.

Si fissa una **soglia di 5 l/s** che indica due categorie di impianti:

- I. impianti di categoria I con portata media emunta inferiore o uguale a 5 l/s;
- II. impianti di categoria II con portata media emunta superiore a 5 l/s.

Il valore di portata prelevato è determinato dal massimo fabbisogno giornaliero (volume) di acqua dell'impianto per svolgere le funzioni di condizionamento dell'edificio diviso il numero di ore giornaliere di funzionamento dello stesso.

Per gli impianti di categoria I non sono necessarie indagini idrochimiche ma ci si può basare sulla bibliografia.

Per gli impianti di categoria II occorre eseguire un campionamento a monte e uno a valle per **verificare che il livello di inquinamento sia analogo nei due punti**.

Costituiscono eccezioni a tale modalità, anche per gli impianti di categoria I, **i casi di prelievo di acque in zone di contaminazione diffusa o di presenza di plume**. Costituisce ulteriore caso a parte la reimmissione di acque prelevate per scopi geotermici provenienti da siti oggetto di procedure di bonifica;

# Impianti a circuito aperto - Lombardia

Contenuti della relazione a corredo dell'istanza di reimmissione in acquifero delle acque prelevate per scambio termico

La relazione è composta dalle seguenti tre sezioni:

- Sezione sull'impianto di scambio termico (a cura di un tecnico abilitato);
- **Sezione geologica e idrogeologica (predisposta da un geologo abilitato);**
- Sezione costruttiva delle opere di presa e resa (predisposta da un tecnico abilitato).

## **Sezione sull'impianto di scambio termico (a cura di un tecnico abilitato);**

- .....
- la portata media modulata della pompa di calore;
- la portata massima emunta (l/s) all'opera di presa;
- la temperatura di andata e ritorno dalla pompa di calore;
- .....

# Impianti a circuito aperto - Lombardia

## Sezione geologica e idrogeologica (predisposta da un geologo abilitato)

Inquadramento territoriale

Inquadramento geomorfologico, geologico e idrogeologico

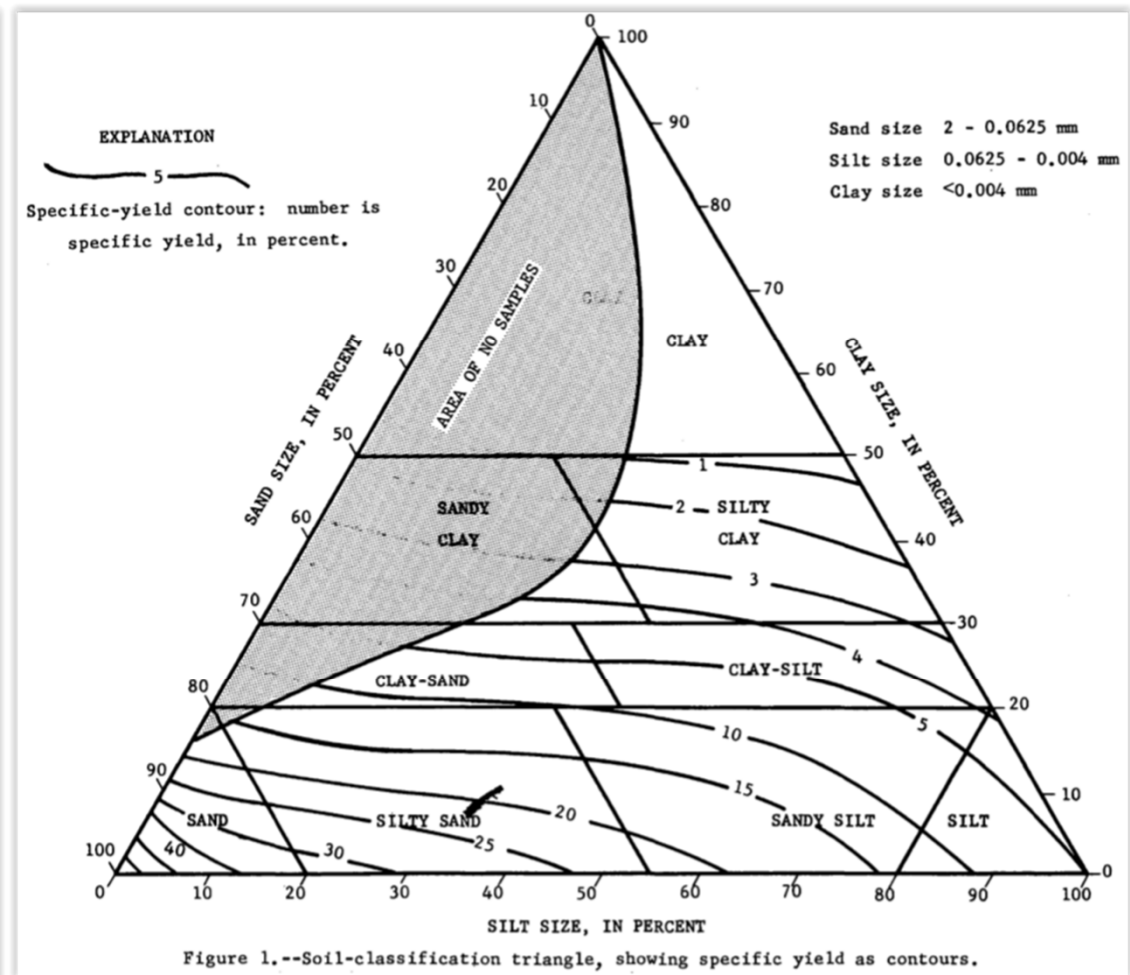
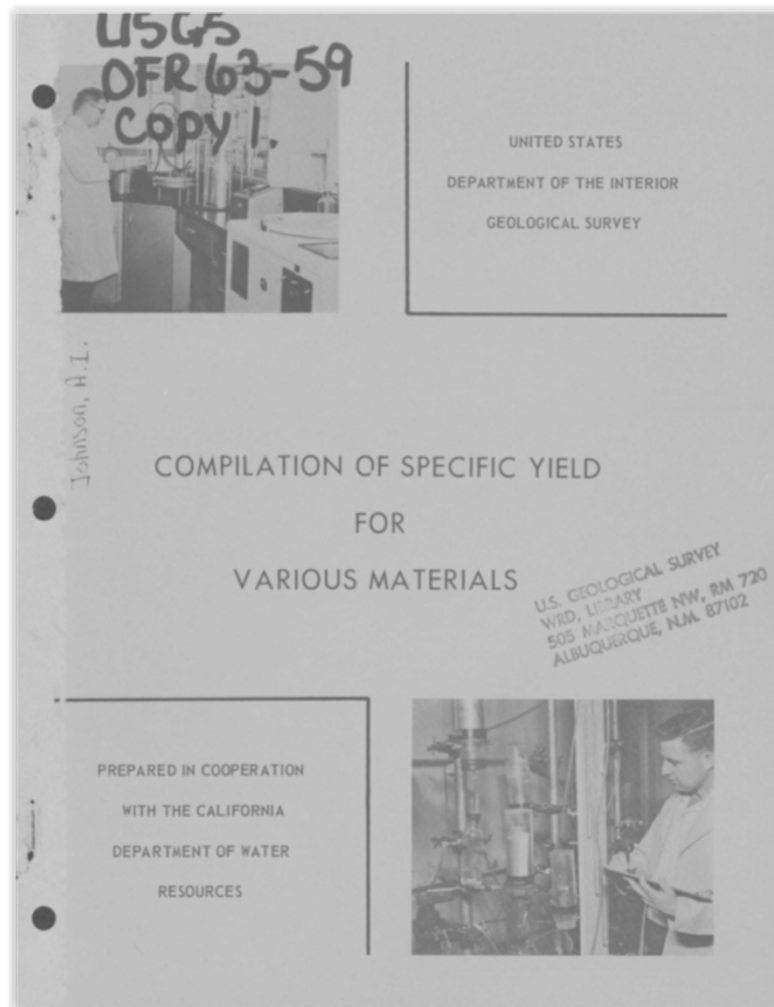
- .....
- Identificazione dei litotipi sia affioranti che presenti fino alle profondità interessate dalla derivazione (desumibile anche da bibliografia o cartografia geologica esistente)

• .....

Caratteristiche idrogeologiche e piezometria

- .....
- tavola sezione idrogeologica
- indicazione dei parametri idrogeologici calcolati o desunti da bibliografia
- indicazione delle oscillazioni della superficie piezometrica nel tempo
- **valutazione dell'interferenza tra le opere di presa e resa**, al fine di **evitare fenomeni di cattura delle acque restituite e/o di eventuale interferenza con altre opere di presa o resa** di terzi; qualora le opere siano pozzi di emungimento la valutazione va effettuata sulle portate di progetto, ad esempio utilizzando formulazioni analitiche o, preferibilmente, **modelli di flusso analitici o numerici**.

## Specific yield – Valori di riferimento da bibliografia



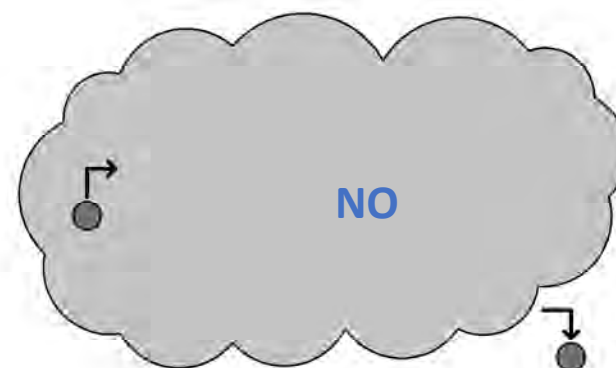
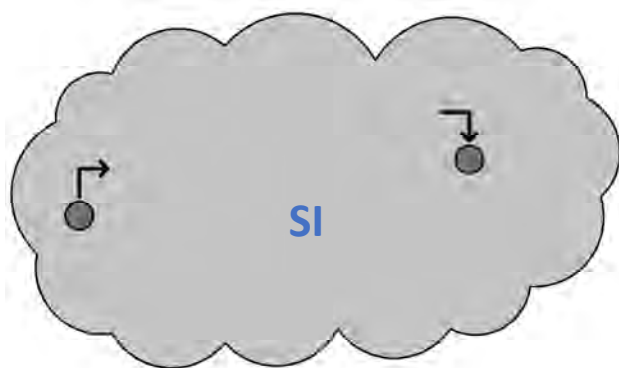
A. I. Johnson, "Specific yield: compilation of specific yields for various materials," Washington, D.C., 1967.

# Impianti a circuito aperto - Lombardia

Sezione geologica e idrogeologica (predisposta da un geologo abilitato)

Qualità delle acque sotterranee

Concetto: evitare di spostare dell'inquinamento dall'opera di presa a quella di resa – Punto D)



# Impianti a circuito aperto - Lombardia

## Sezione geologica e idrogeologica (predisposta da un geologo abilitato)

### Recapito

Descrizione dei potenziali effetti sull'andamento piezometrico ed sulle temperature della falda oggetto di reimmissione, in ragione sia delle portate reimmesse previste che della trasmissività dell'acquifero, ad esempio **utilizzando formulazioni analitiche o, preferibilmente, modelli di trasporto analitici o numerici.**

## Sezione costruttiva delle opere di presa e resa (predisposta da un tecnico abilitato).

Numero dei pozzi di presa e resa; distanza presa-resa; dimensione e profondità dei pozzi; modalità di realizzazione dei pozzi; gestione dei materiali di perforazione; tipo di pompa installata; modalità di spurgo; **valutazione delle interferenze idrauliche con altre strutture esistenti**, in particolare il **dimensionamento del cono di depressione/ricarica** con altre strutture sotterranee. (questo per la valutazione del rischio di cedimenti/allagamenti interrati)

# Impianti a circuito aperto - Lombardia

## Relazione tecnica finale

- .....
- per le opere di presa prove sulla portata emungibile: relazione tecnica descrittiva delle prove effettuate sulle opere di presa con indicazioni degli andamenti degli abbassamenti in funzione del tempo e delle portate estratte, loro interpretazione e definizione del cono di depressione, indicazioni sull'eventuale interferenza idraulica tra le opere di presa e resa oggetto della domanda, valutazione della possibile l'interferenza con altre opere di captazione posti in proprietà esterne, definizione dei parametri caratteristici degli acquiferi captati;
- per le opere di resa prove sulla portata di reimmissione: relazione tecnica descrittiva delle prove effettuate sulle opere di resa con indicazione degli andamenti degli innalzamenti in funzione del tempo e delle portate reimmesse, loro interpretazione e definizione del cono di innalzamento, indicazioni sull'eventuale interferenza idraulica tra le opere di presa e resa oggetto della domanda, valutazione della possibile l'interferenza con altre opere di captazione poste ad una ragionevole distanza in proprietà esterne;

# Sintesi dei problemi da affrontare e strumenti di calcolo

## Flusso -> MODFLOW

- Come varia l'assetto piezometrico in seguito all'attivazione dell'impianto geotermico (la direzione del flusso localmente si inverte)? (T-A)
- Di che **entità** sono gli **innalzamenti** piezometrici? (T-A)
- Dove sono localizzati? (T-A)
- Di che **entità** sono gli **abbassamenti** piezometrici? (T-A)
- Dove sono localizzati? (T-A)
- Fino a che **distanza** arriva il **disturbo piezometrico**?(A)

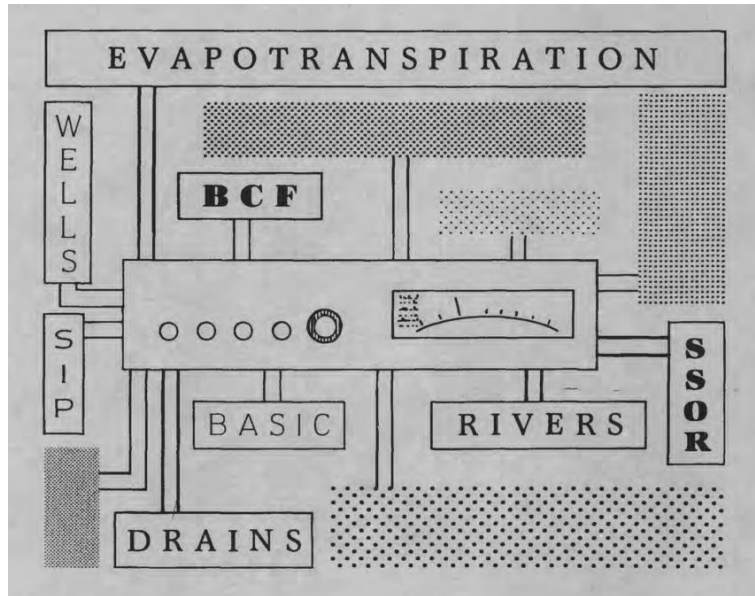
## Trasporto -> MT3DMS

- Come si **propaga il pennacchio termico** a valle dell'impianto? (A)
- Il pennacchio termico disturba altri impianti già presenti a valle? (A)
- Esiste il rischio di cortocircuitazione (il pozzo di presa cattura le acque del pozzo di resa vanificando l'idea di inerzia termica del fluido che deve permettere lo scambio del calore con l'impianto)? (T)

T -> Problemi di tipo tecnico

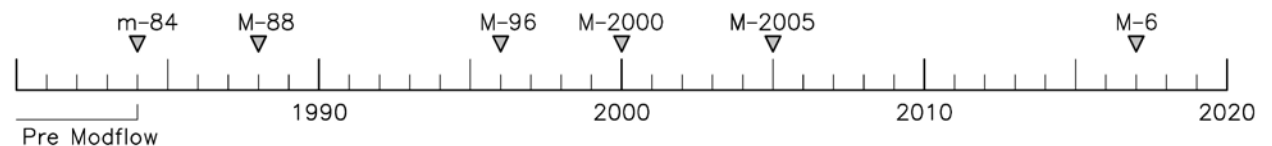
A -> Problemi di tipo amministrativo

# Modflow: Cos'è e come si è sviluppato

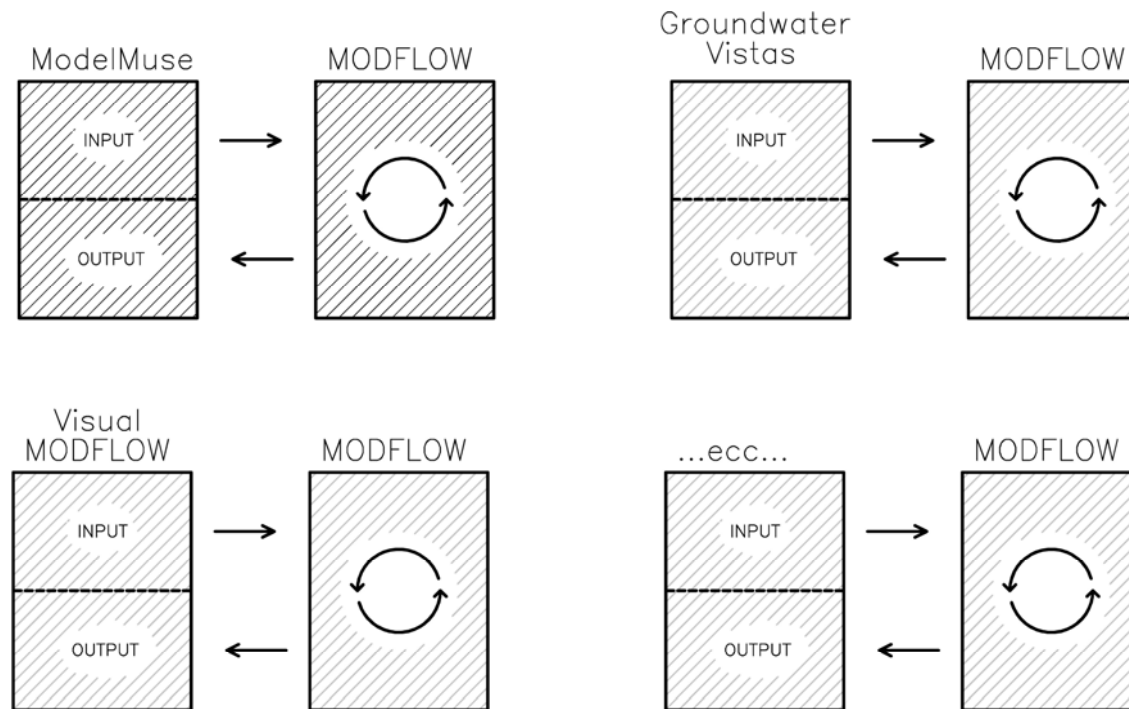


MODFLOW è programma sviluppato dall'U.S. Geological Survey (USGS) che risolve l'equazione del flusso delle acque sotterranee con il metodo delle differenze finite. Rappresenta uno standard a livello mondiale per lo studio dei fenomeni di filtrazione

*Copertina del manuale d'uso di "Modular three dimensional finite difference ground water flow model" (1984)*

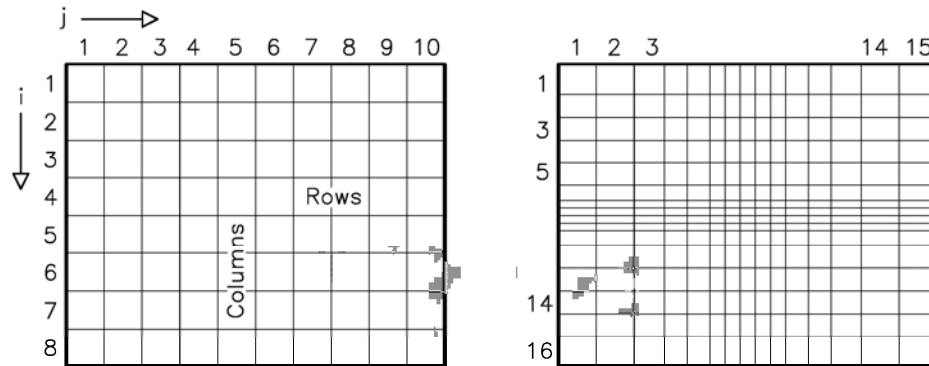


## Modflow: per funzionare necessita di una interfaccia grafica



Anche MT3DMS necessita di una interfaccia grafica

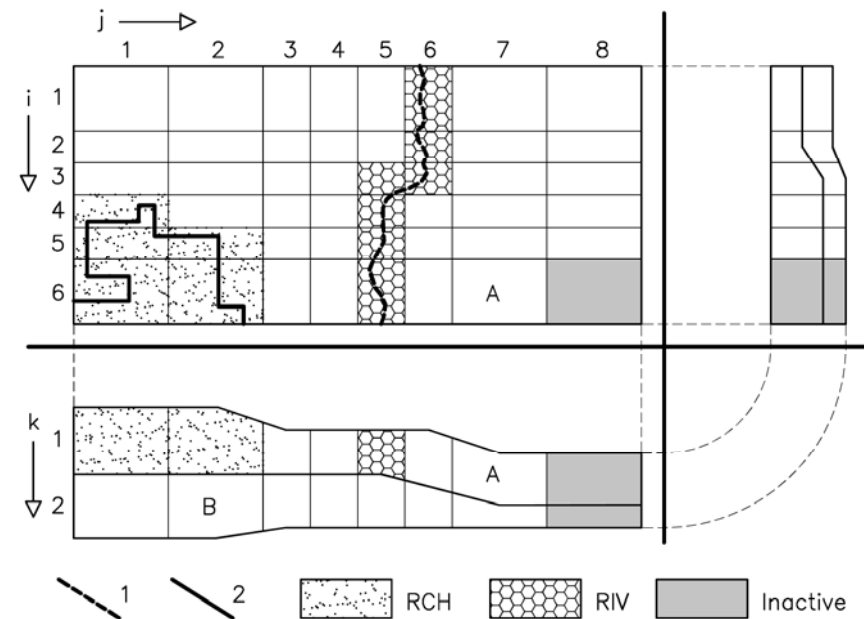
# Modflow: la discretizzazione del volume del modello



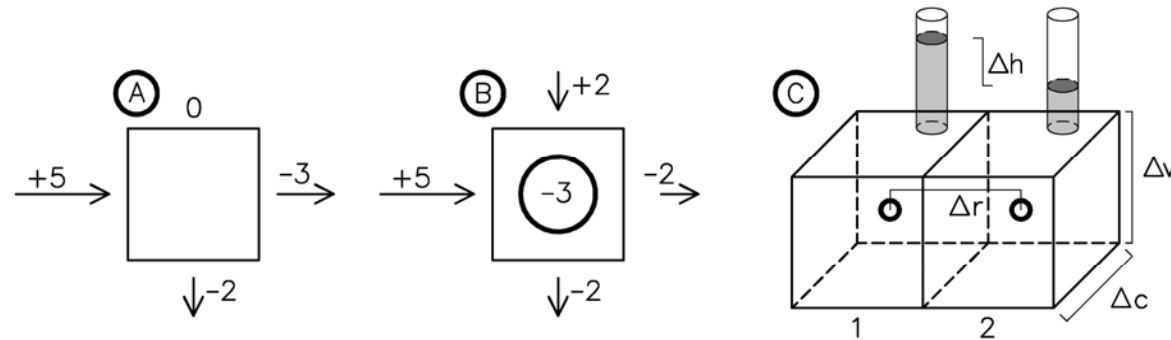
In pianta l'area di modellazione è rettangolare. Viene suddivisa in **celle**, ottenute dall'intersezione di righe e colonne. In MODFLOW-2005 in pianta **le celle sono quadrate o rettangolari**

In senso verticale il volume interessato dalla modellazione viene suddiviso in layer. I **layer** possono avere **base e tetto orizzontali o irregolari**.

Se i layer hanno base e tetto orizzontali il loro spessore si mantiene costante. Le caratteristiche del modello ( $K$ ,  $S_y$ , Condizioni al contorno) vengono associate alle celle e, all'interno di ogni cella, si assumono costanti.



## Modflow: principio di funzionamento (1/2)



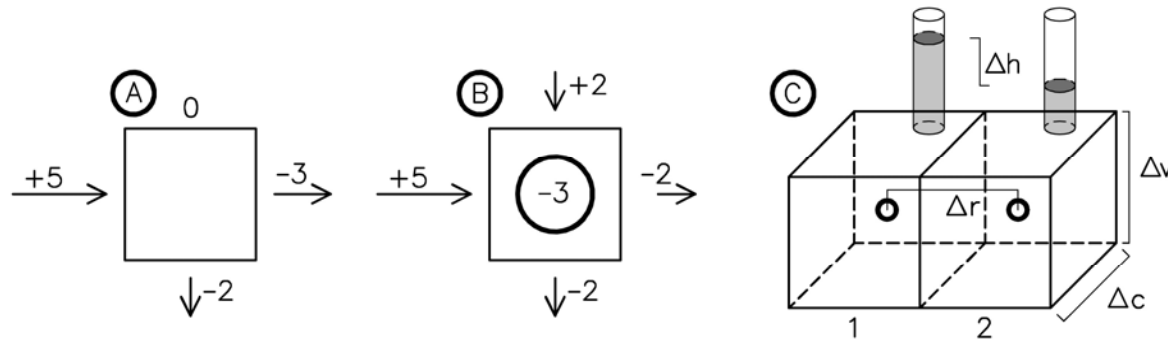
**In condizioni stazionarie non ci può essere accumulo o cessione d'acqua dall'acquifero.**

Pertanto in ogni cella la somma delle portate in ingresso (+q) deve essere uguale alla somma delle portate in uscita (-q)

A: Cella del modello senza alcuna condizione di stress applicata (quasi tutte);

B: Cella del modello con un pozzo che estrae acqua.

## Modflow: principio di funzionamento (2/2)



Come si calcola la portata in entrata e in uscita dalle facce di una cella?

In:

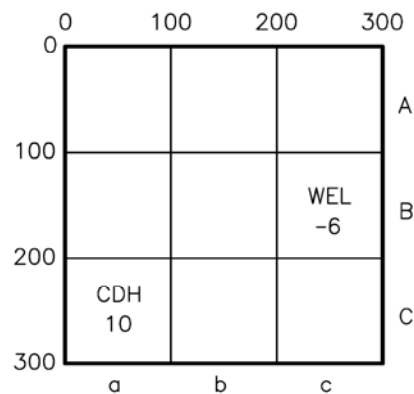
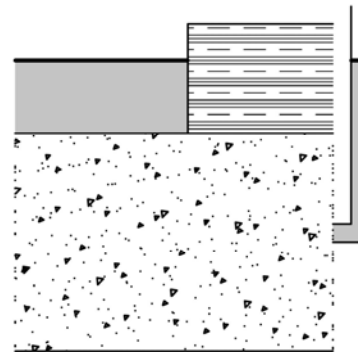
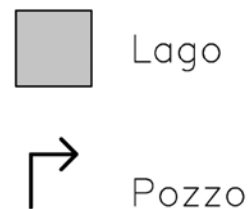
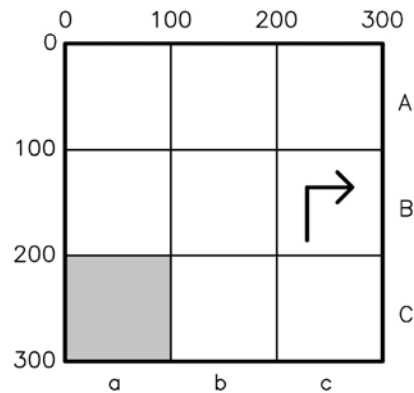
- condizioni stazionarie;
- condizioni confinale;
- K omogeneo ed isotropo;

il calcolo viene eseguito applicando semplicemente la **formula di Darcy**

$$Q = K \frac{\Delta h}{\Delta r} (\Delta c \cdot \Delta v)$$

$\Delta h$  rappresenta l'unica variabile ignota

## Esempio di calcolo – Schema di riferimento



Ideale modello MODFLOW 3 x 3 celle

- 1 layer;
- condizioni stazionarie;
- flusso in condizioni confinate;
- K isotropo e omogeneo uguale a 2;
- celle quadrate di 100 x 100 di lato;
- spessore dell'unico layer di 3;
- livello dell'acqua del lago: 10;
- portata estratta dal pozzo: -6.

**Unità di misura?? Qualunque, basta che siano consistenti.**

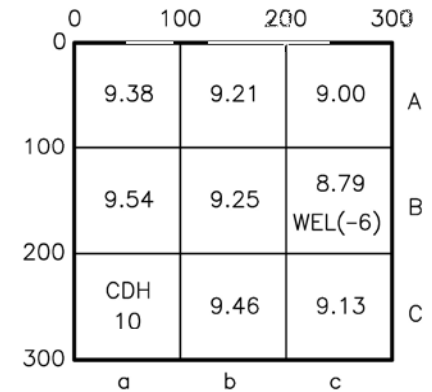
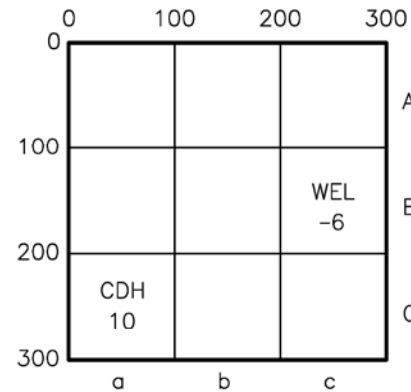
Potrebbero essere metri e secondi; centimetri e minuti; ecc...

**Suggerimento: usare sempre metri e secondi.**

## Esempio di calcolo – Risultati del calcolo

Ideale modello MODFLOW 3 x 3 celle

- 1 layer;
- condizioni stazionarie;
- flusso in condizioni confinate;
- K isotropo e omogeneo uguale a 2;
- celle quadrate di 100 x 100 di lato;
- spessore dell'unico layer di 3;
- livello dell'acqua del lago: 10;
- portata estratta dal pozzo: -6.

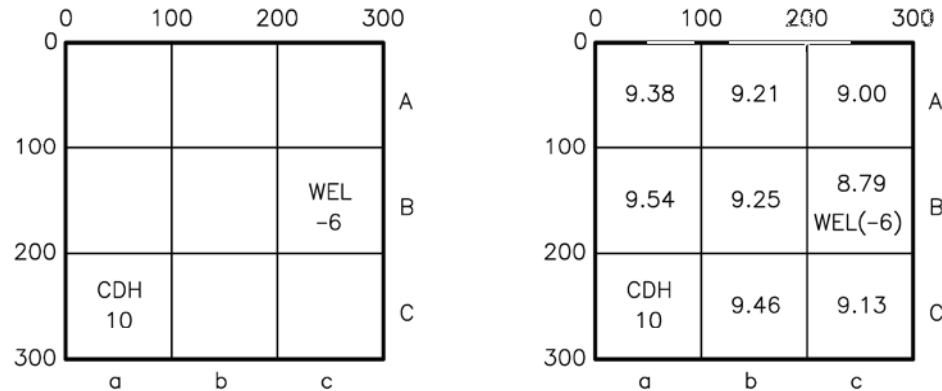


**MODFLOW prova e riprova** fintanto che non ottiene in tutte le celle del modello una distribuzione dei carichi idraulici tale da soddisfare il bilancio di massa in tutte le celle del modello ( $Q_{in} = Q_{out}$ ).

Formula generale per il calcolo della portata fra due celle del modello:

$$Q = K \frac{\Delta h}{\Delta r} (\Delta c \Delta v) = 2 \frac{\Delta h}{100} 100 \cdot 3 = 6 \Delta h$$

## Esempio di calcolo – Verifica del risultato



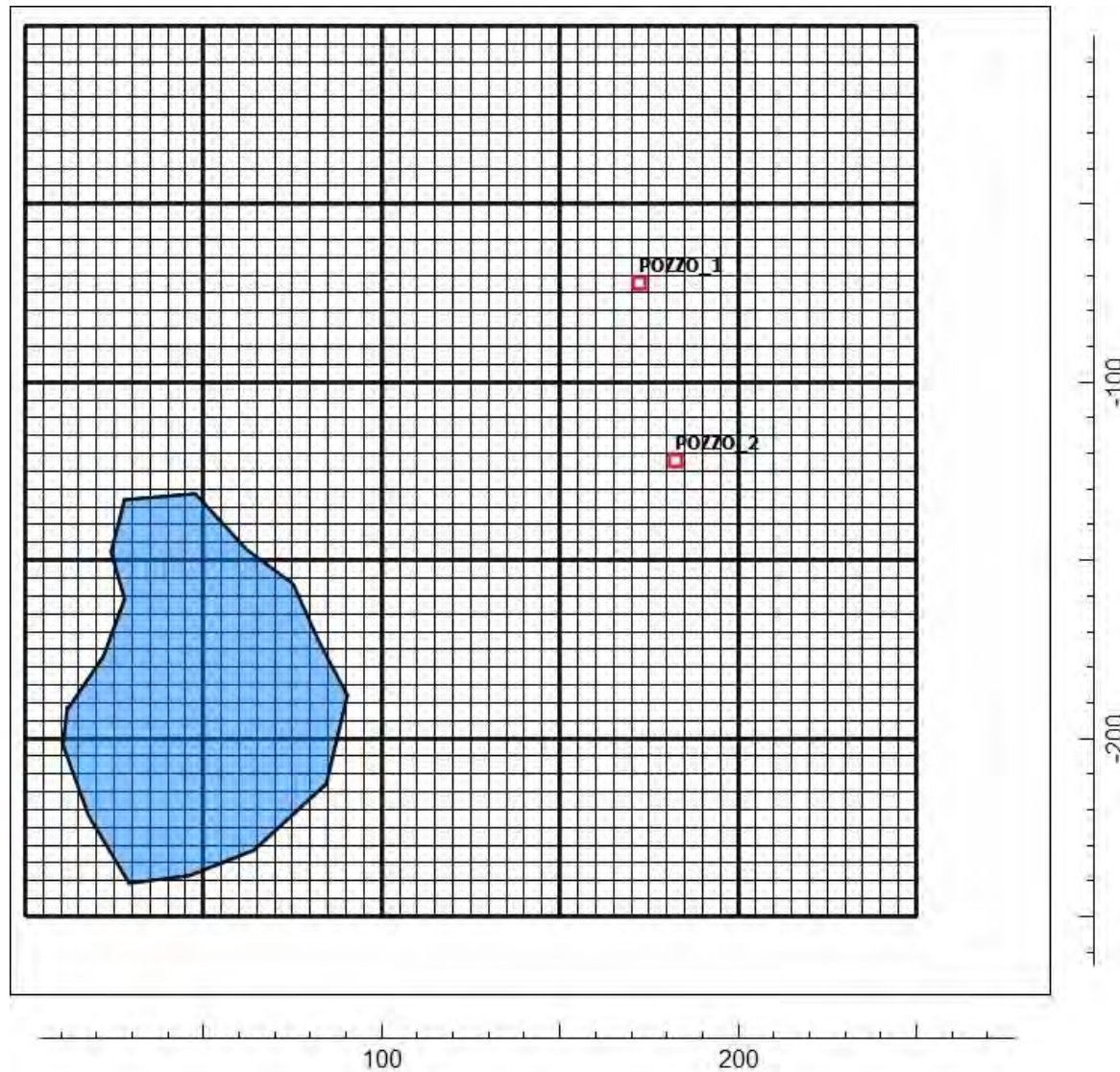
Si può naturalmente provare a fare l'esercizio in tutte le restanti celle. Per la cella cB ricordarsi di inserire la Q in uscita dal pozzo

$$Q = K \frac{\Delta h}{\Delta r} (\Delta c \Delta v) = 2 \frac{\Delta h}{100} 100 \cdot 3 = 6 \Delta h$$

$$\begin{aligned} Q_{aC} &= 6 \cdot (10 - 9.54) = 6 \cdot 0.46 = 2.76 \\ \text{Cella}_{aB} \quad Q_{bB} &= 6 \cdot (9.25 - 9.54) = 6 \cdot (-0.29) = -1.74 \\ Q_{aC} &= 6 \cdot (9.38 - 9.54) = 6 \cdot -(0.16) = -0.96 \end{aligned}$$

$$Q_{TOT} = 2.76 - 1.74 - 0.96 = 0.06 \approx 0$$

## Semplice modello Modflow: lago (alimenta) + 2 pozzi (emungono)



Versione più realistica:

50 x 50 celle quadrate da 5 m di lato ( $\Delta c = \Delta r = 5 \text{ m}$ )

Lago: CHD=+10 m

Pozzo 1=  $Q_1 = -2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = -2 \text{ L/s}$

Pozzo 2=  $Q_2 = -3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = -3 \text{ L/s}$

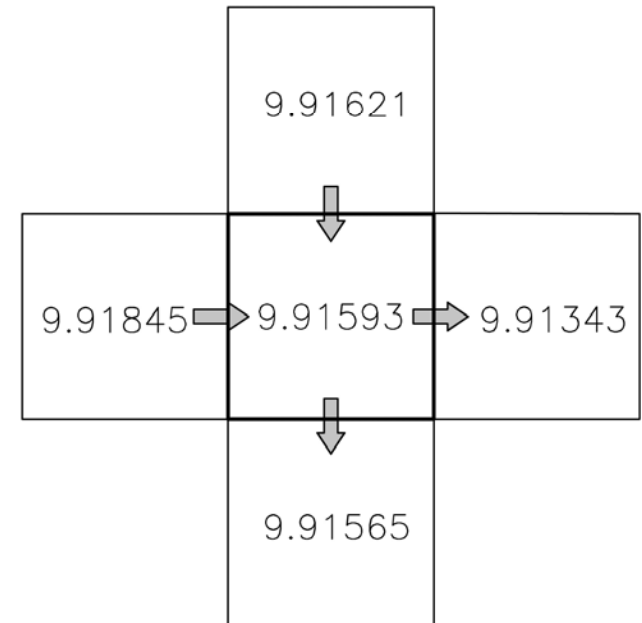
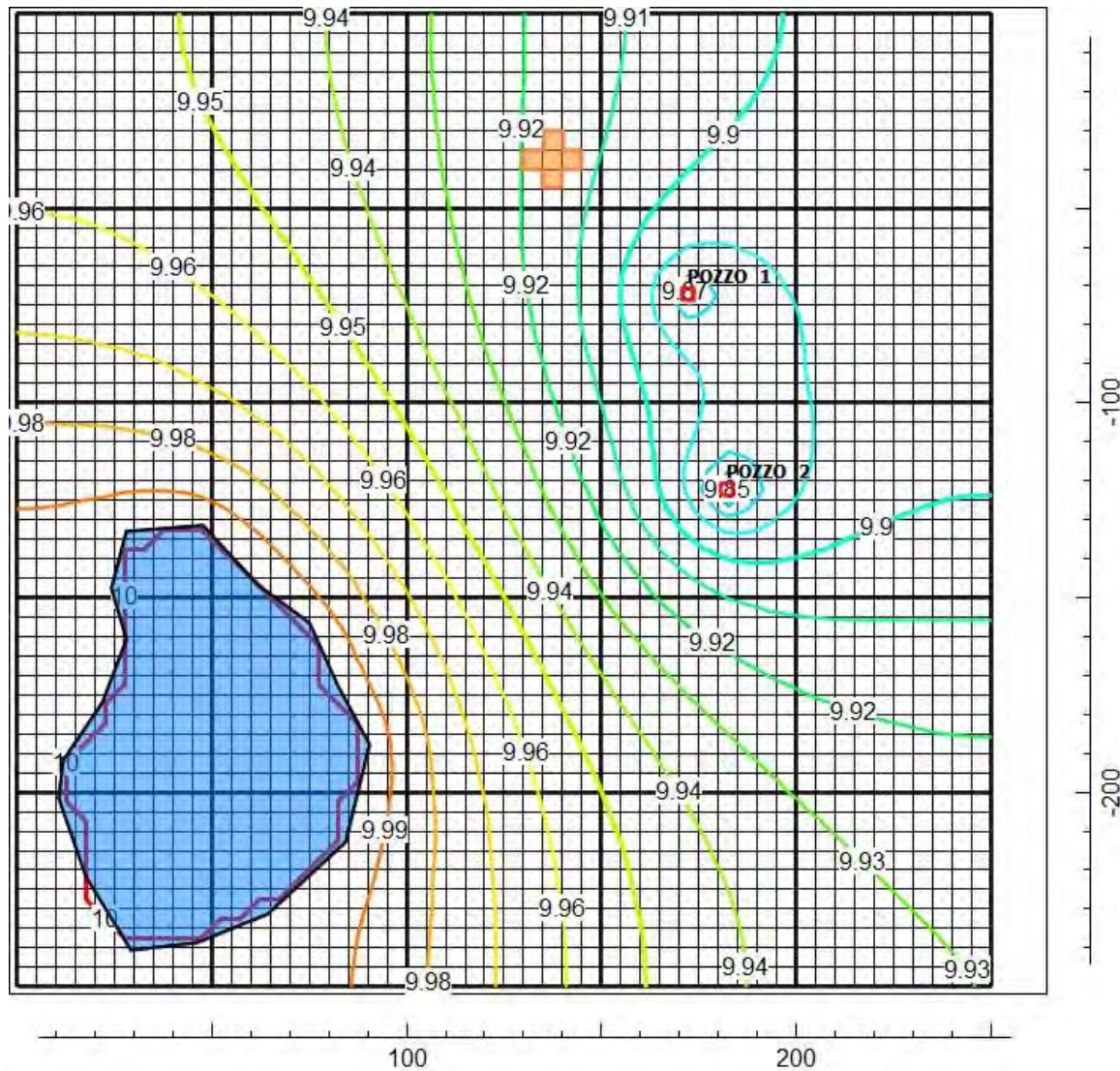
$K=6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Spessore acquifero ( $\Delta v$ ): 15 m

Flusso in condizioni confinate

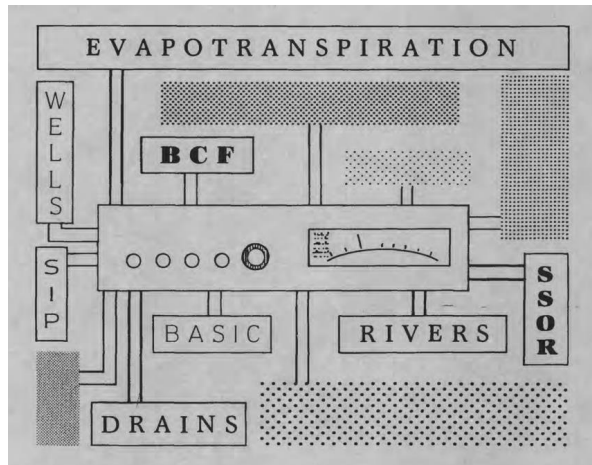
Condizioni stazionarie

## Semplice modello Modflow: distribuzione dei carichi idraulici



Rifacendo il calcolo si può verificare che la somma delle portate in ingresso è uguale alla somma delle portate in uscita.

# Modflow: I Packages



| Nome del Package                  | Abbreviazione | Categoria del Package |
|-----------------------------------|---------------|-----------------------|
| Basic                             | BAS           | Program Control       |
| Block-Centered Flow               | BFC           | Hydrologic/Internal   |
| Layer-Property Flow               | LPF           | Hydrologic/Internal   |
| Horizontal Flow Barrier           | HFB           | Hydrologic/Internal   |
| Well                              | WEL           | Hydrologic/Stress     |
| Recharge                          | RCH           | Hydrologic/Stress     |
| River                             | RIV           | Hydrologic/Stress     |
| General-Head Boundary             | GHB           | Hydrologic/Stress     |
| Drain                             | DRN           | Hydrologic/Stress     |
| Evapotranspiration                | EVT           | Hydrologic/Stress     |
| Strongly Implicit Procedure       | SIP           | Solver                |
| Preconditioned Conjugate Gradient | PCG           | Solver                |
| Direct Solution                   | DE4           | Solver                |

$$\sum Qf_i + \sum Qs_i - SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V = 0$$

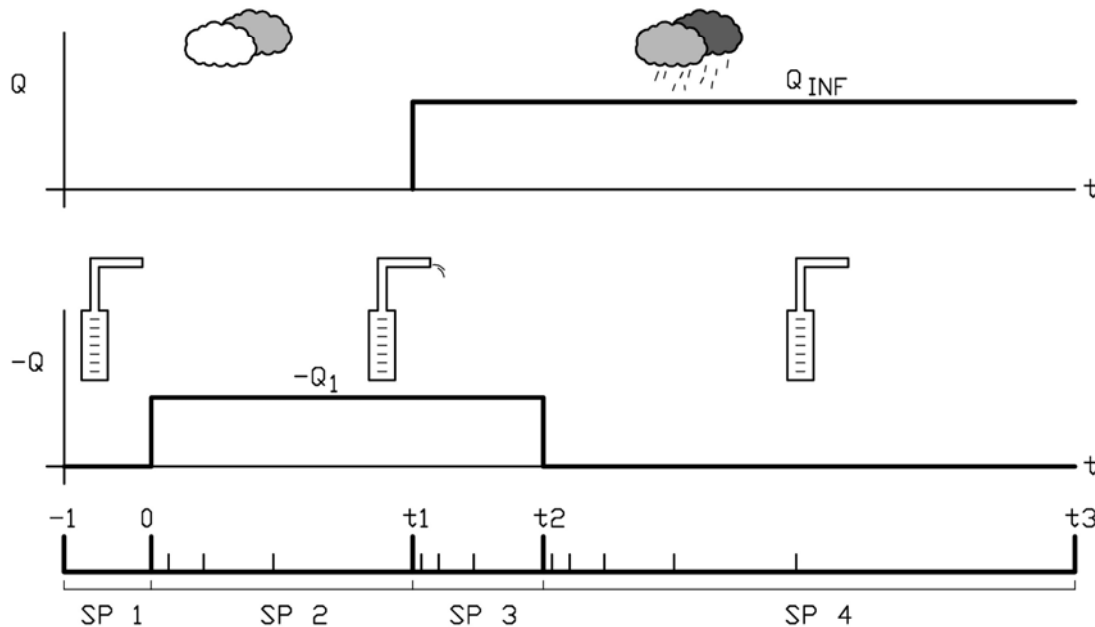
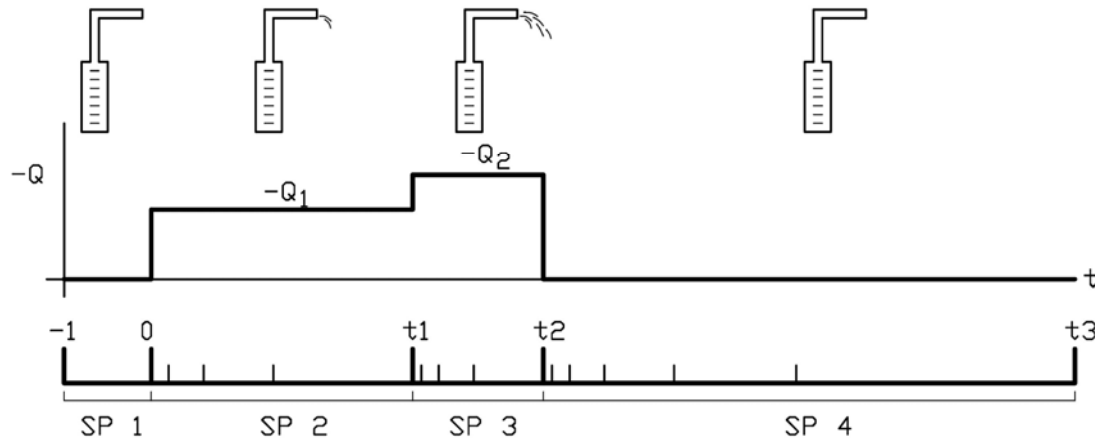
- I Package **Hydrologic/Internal** servono per definire i parametri per **calcolare il flusso fra celle adiacenti**, cioè il termine  $\sum Qf_i$  e  $SS(\Delta h/\Delta t)\Delta V$ ;
- i Package **Hydrologic/Stress** servono per definire i parametri da inserire nell'equazione di flusso per quelle celle a cui sono applicate delle **condizioni di stress** (pozzi, fiumi, ricarica, ecc), cioè rappresentano il termine  $\sum Qs_i$ ;
- i Package **Solver** servono per **risolvere il sistema di equazioni** di tutte le celle del modello con il metodo delle differenze finite.
- Il Package **program control non assolve ad alcuna funzione specifica** ma semplicemente sovrintende a tutto lo svolgimento del programma

# Modflow: I Packages

Combinando i vari Packages fra di loro è possibile simulare qualunque configurazione di flusso, compreso un impianto geotermico a circuito aperto con pozzi di presa (-Q) e pozzi di resa (+Q).

| Nome                                                                     | Abbreviazione | Categoria           | MODFLOW-2005 | MODFLOW-6 |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|--------------|-----------|
| Block-Centered Flow                                                      | BCF6          | Flow Packages       | X            |           |
| Layer Property Flow                                                      | LPF           | Flow Packages       | X            |           |
| Hydrogeologic Unit Flow                                                  | HUF2          | Flow Packages       | X            |           |
| Horizontal Flow Barrier                                                  | HFB           | Flow Packages       | X            | X         |
| Unsaturated-Zone Flow                                                    | UZF           | Flow Packages       | X            |           |
| Seawater Intrusion                                                       | SWI2          | Flow Packages       | X            |           |
| Node Property Flow                                                       | NPF           | Flow Packages       |              | X         |
| Storage                                                                  | STO           | Flow Packages       |              | X         |
| Time-Variant Specified-Head                                              | CHD           | Boundary Conditions | X            | X         |
| Flow and Head Boundary                                                   | FHB           | Boundary Conditions | X            |           |
| Recharge                                                                 | RCH           | Boundary Conditions | X            | X         |
| Well                                                                     | WEL           | Boundary Conditions | X            | X         |
| Drain                                                                    | DRN           | Boundary Conditions | X            | X         |
| Drain Return                                                             | DRT           | Boundary Conditions | X            |           |
| Evapotranspiration Segments                                              | ETS           | Boundary Conditions | X            | X         |
| Evapotranspiration                                                       | EVT           | Boundary Conditions | X            |           |
| General-Head Boundary                                                    | GHB           | Boundary Conditions | X            | X         |
| Lake                                                                     | LAK           | Boundary Conditions | X            |           |
| Lake Package for MODFLOW-6                                               | LAK           | Boundary Conditions |              | X         |
| Multi-Node Well                                                          | MNW1          | Boundary Conditions | X            |           |
| Multi-Node Well                                                          | MNW2          | Boundary Conditions | X            |           |
| Multi-Aquifer Well                                                       | MAW           | Boundary Conditions |              | X         |
| Water Mover                                                              | MVR           | Boundary Conditions |              | X         |
| Reservoir                                                                | RES           | Boundary Conditions | X            |           |
| River                                                                    | RIV           | Boundary Conditions | X            | X         |
| Stream-Flow Routing                                                      | SFR           | Boundary Conditions | X            |           |
| MODFLOW-6 Stream-Flow Routing                                            | SFR           | Boundary Conditions |              | X         |
| Stream                                                                   | STR           | Boundary Conditions | X            |           |
| Unsaturated-Zone Flow package for MODFLOW-6                              | UZF6          | Boundary Conditions |              | X         |
| Preconditioned Conjugate Gradient                                        | PCG           | Solver              | X            |           |
| Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control | PCGN          | Solver              | X            |           |
| Geometric Multigrid                                                      | GMG           | Solver              | X            |           |
| Strongly Implicit Procedure                                              | SIP           | Solver              | X            |           |
| Direct Solver                                                            | DE4           | Solver              | X            |           |
| Iterative Model Solution                                                 | IMS           | Solver              |              | X         |

# Modflow: le condizioni transitorie



Uno **stress period** è un **intervallo di tempo** durante il quale gli **stress applicati al modello si mantengono costanti**.

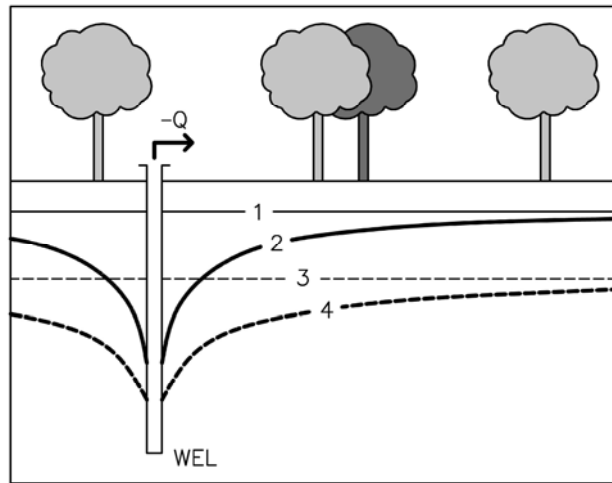
Usualmente:

- una simulazione in condizioni stazionarie consiste di un unico stress period;
- una simulazione in condizioni transitorie consiste in 2 o più stress period il primo in condizioni stazionarie, i seguenti in condizioni transitorie.

Uno **stress period** al suo interno è **suddiviso in time step**. Lo scopo dei Time Step è verificare come evolve il sistema nel corso dello stress period e migliorare il risultato del calcolo

# Importanza della scelta corretta dell'Initial head in simulazione Transient State

In **condizioni transitorie** l'Initial Head influenza il risultato finale



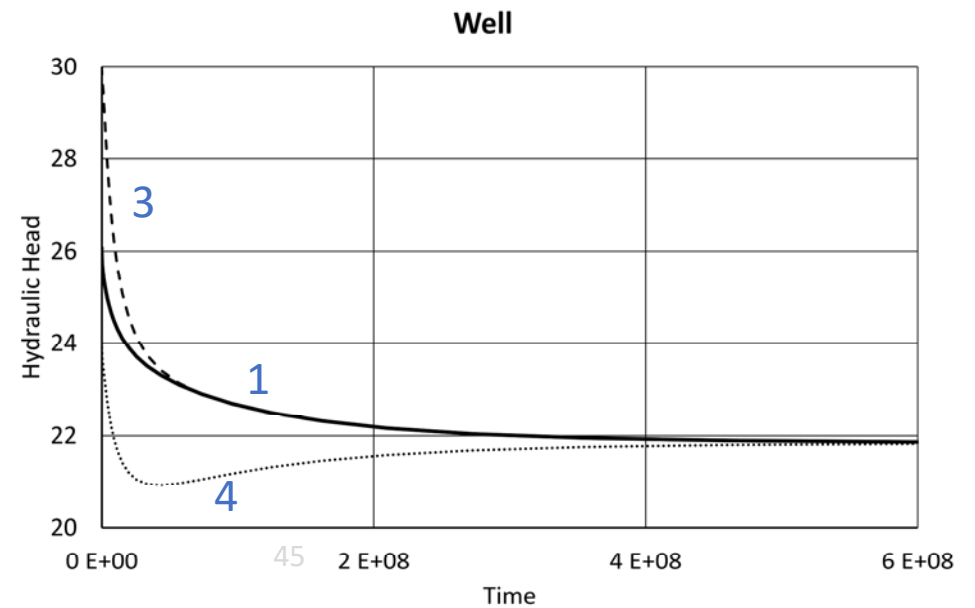
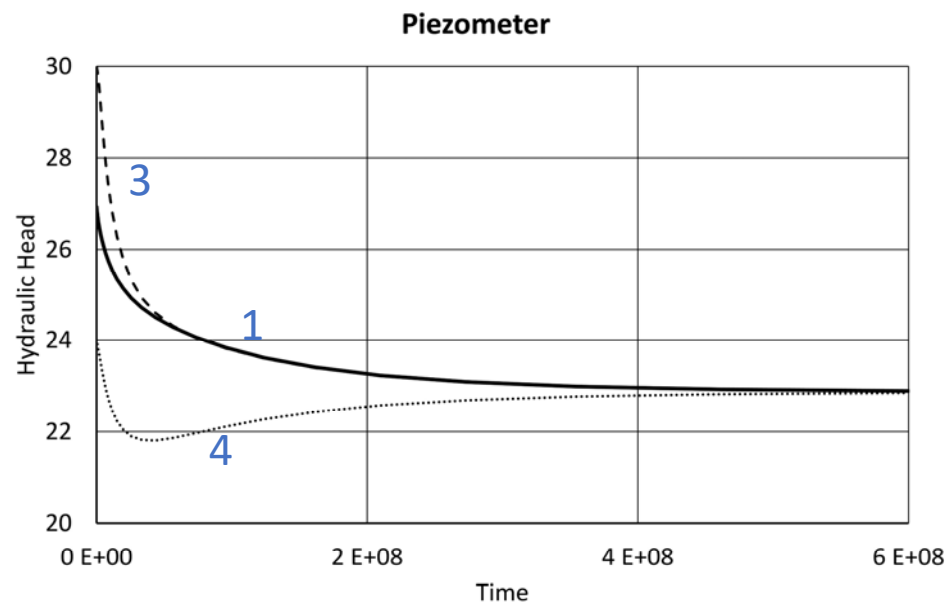
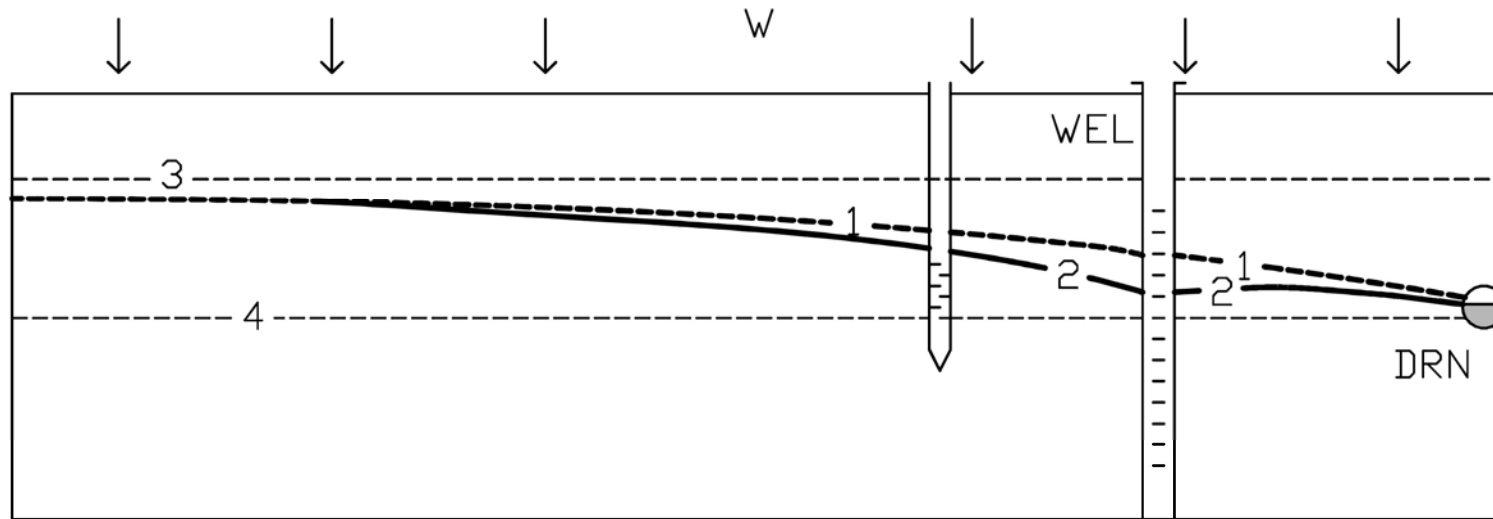
A parità di portata di estrazione e di durata del pompaggio:

- se nel modello le condizioni di partenza prevedono un Initial Head uniforme ed a quota 1, dopo un tempo la superficie piezometrica avrà assunto l'andamento 2.
- se nel modello le condizioni di partenza prevedono un Initial Head uniforme ed a quota 3, dopo un certo tempo la superficie piezometrica avrà assunto l'andamento 4.

Schema metodologico generale:

- si definisce senza troppa cura un andamento dell'Initial Head, ad esempio mantenendolo coincidente con il top del modello;
- si usa questo set di dati come partenza per il **primo stress period** della simulazione in **condizioni stazionarie** finalizzato a ricostruire **l'assetto dell'acquifero indisturbato**;
- a questo primo time step se ne fa seguire **un secondo** (poi eventualmente altri) in **condizioni transitorie** per osservare il comportamento dell'acquifero in seguito all'applicazione dello stress.

## Importanza della scelta corretta dell'Initial head in simulazione Transient State



## Hydrologic Internal Flow Package – layer confined/convertible

### In idrogeologia si intende

| Condizioni confinate                                                                                                                                                                                                                               | Condizioni freatiche                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| La sezione di filtrazione dipende dallo spessore dell'acquifero e non dipende dal carico idraulico delle condizioni al contorno (sempre che il carico non si abbassi al di sotto del bottom del livello di confinamento superiore).                | La sezione di filtrazione dipende dal carico idraulico.<br>Se $H$ aumenta, aumenta anche lo spessore saturo.                                                                                                                                                                                         |
| In condizioni transitorie non c'è svuotamento o riempimento dei pori in quanto tutto resta sempre saturo. Il rilascio/immagazzinamento dell'acqua avviene per deformazione dello scheletro solido ed è governato dallo Specific Storage ( $S_s$ ). | In condizioni transitorie c'è svuotamento o riempimento dei pori dell'acquifero. Il rilascio/immagazzinamento dell'acqua avviene per riempimento o svuotamento dei pori, limitatamente a quelli di dimensioni sufficientemente grandi. Il fenomeno è governato dallo Specific Yield ( $S_y = n_e$ ). |

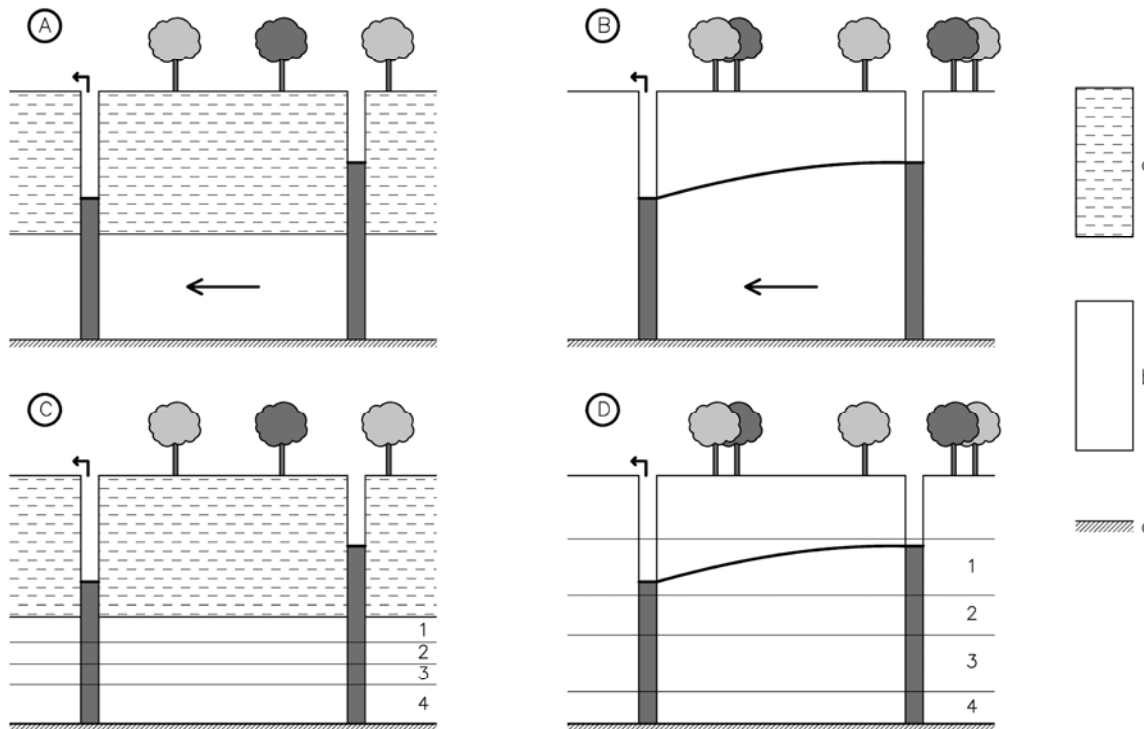
## Hydrologic Internal Flow Package – layer confined/convertible

### Se si risolve analiticamente

Si applicano formule differenti per il caso di moto in condizioni confinate e per il caso di moto in condizioni freatiche.

### Se si risolve con MODFLOW

Si specifica in quali layer il moto è sicuramente di tipo confinato (layer sicuramente sempre saturi) e i layer nei quali ci potrebbero essere condizioni di parziale desaturazione.



A e B: esempi di filtrazione piana fra due trincee

- A: filtrazione in condizioni confinate;
- B: filtrazione in condizioni freatiche.

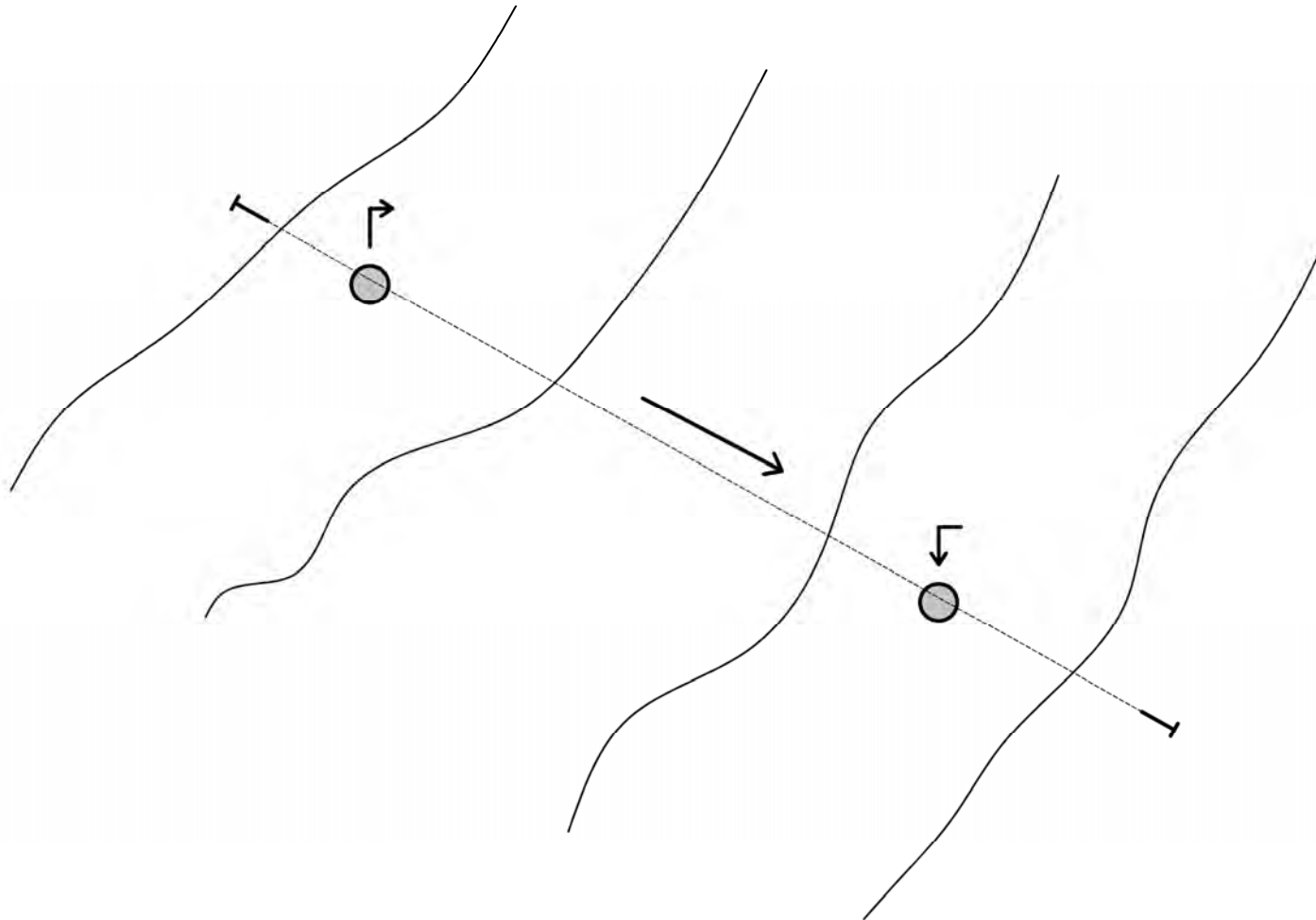
C e D: schematizzazione MODFLOW.

- C: layer 1, 2, 3 e 4 tutti di tipo confined;
- D: layer 1 di tipo convertible; layer 2, 3 e 4 di tipo confined.

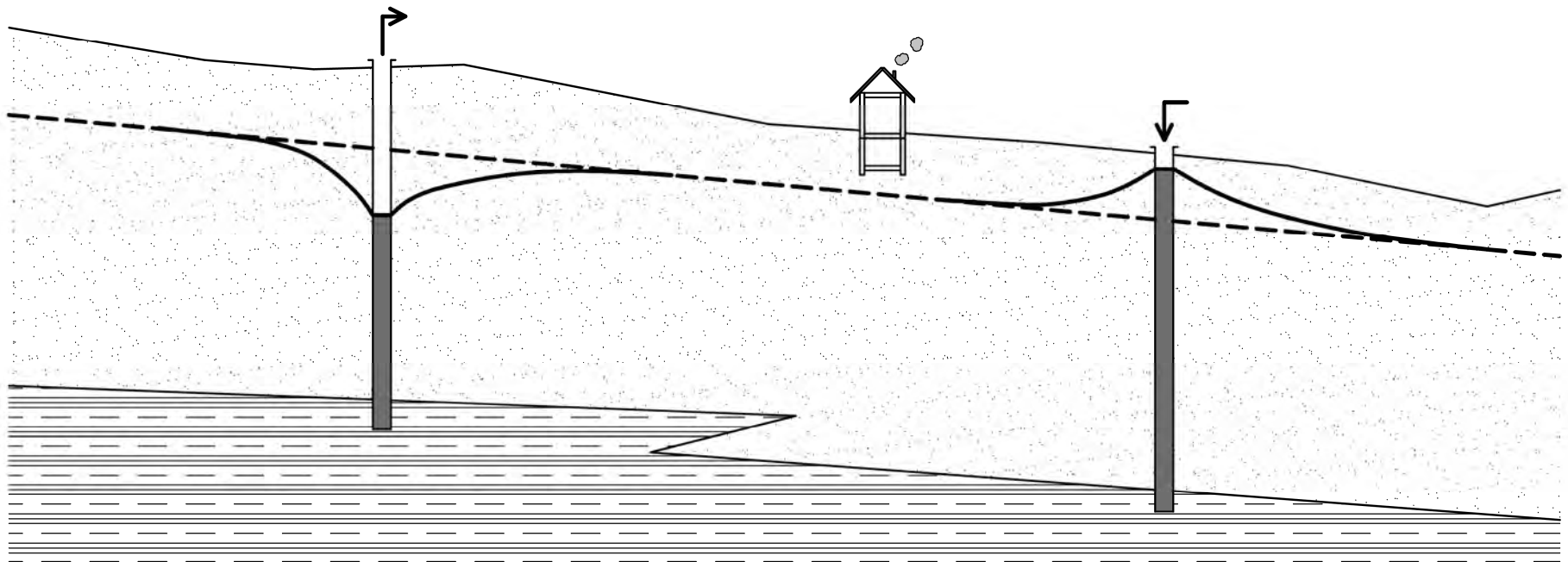
## **Suggerimenti per iniziare a muoversi con MODFLOW**

- Scaricare l'interfaccia ModelMuse
- Installare e configurare MODFLOW
- Partire con casi elementari da risolvere analiticamente poi con MODFLOW per vedere come risponde il modello
- Evitare di usare subito MODFLOW per risolvere problemi reali

## Schema concettuale di impianto di presa e resa



## Variazioni piezometriche nell'area di presa e di resa



# Schema ipotetico di necessità idriche dell'impianto

| Ora        | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | TOT | Q (L/s) |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|---------|
| GENNAIO    | 9  | 18 | 23 | 13 | 16 | 19 | 40 | 28 | 22 | 27 | 35 | 23 | 8  | 19 | 7  | 15 | 13 | 19 | 12 | 11 | 19 | 20 | 27 | 16 | 460 | 5.3     |
| FEBBRAIO   | 13 | 27 | 27 | 22 | 25 | 20 | 25 | 25 | 37 | 16 | 19 | 13 | 9  | 10 | 9  | 18 | 13 | 12 | 10 | 13 | 31 | 15 | 29 | 20 | 457 | 5.3     |
| MARZO      | 8  | 8  | 19 | 15 | 10 | 19 | 21 | 20 | 28 | 22 | 16 | 7  | 8  | 6  | 9  | 4  | 10 | 9  | 9  | 17 | 21 | 12 | 10 | 18 | 328 | 3.8     |
| APRILE     | 6  | 4  | 8  | 8  | 10 | 11 | 18 | 9  | 17 | 16 | 6  | 8  | 4  | 14 | 12 | 6  | 10 | 8  | 3  | 12 | 14 | 12 | 13 | 5  | 232 | 2.7     |
| MAGGIO     | 4  | 1  | 1  | 3  | 2  | 2  | 3  | 7  | 13 | 8  | 10 | 8  | 35 | 16 | 27 | 35 | 32 | 25 | 18 | 6  | 9  | 7  | 3  | 5  | 279 | 3.2     |
| GIUGNO     | 4  | 3  | 5  | 2  | 2  | 3  | 7  | 8  | 22 | 27 | 16 | 37 | 44 | 61 | 27 | 50 | 58 | 24 | 35 | 12 | 6  | 8  | 7  | 7  | 475 | 5.5     |
| LUGLIO     | 12 | 9  | 10 | 7  | 13 | 5  | 5  | 17 | 49 | 55 | 52 | 59 | 37 | 43 | 31 | 95 | 92 | 36 | 40 | 28 | 9  | 8  | 8  | 19 | 737 | 8.5     |
| AGOSTO     | 7  | 8  | 10 | 9  | 10 | 3  | 4  | 27 | 39 | 31 | 26 | 36 | 44 | 38 | 51 | 64 | 63 | 64 | 65 | 24 | 5  | 7  | 7  | 15 | 657 | 7.6     |
| SETTEMBRE  | 5  | 4  | 6  | 4  | 6  | 2  | 3  | 8  | 16 | 20 | 23 | 46 | 27 | 31 | 24 | 56 | 28 | 35 | 33 | 6  | 4  | 5  | 2  | 4  | 398 | 4.6     |
| OTTOBRE    | 4  | 6  | 8  | 4  | 5  | 5  | 7  | 7  | 6  | 13 | 15 | 14 | 16 | 36 | 21 | 31 | 27 | 20 | 27 | 6  | 6  | 7  | 3  | 5  | 298 | 3.5     |
| NOVEMBRE   | 15 | 6  | 10 | 10 | 13 | 10 | 10 | 18 | 16 | 17 | 24 | 9  | 12 | 21 | 12 | 7  | 20 | 19 | 11 | 21 | 13 | 8  | 9  | 12 | 323 | 3.7     |
| DICEMBRE   | 17 | 10 | 8  | 22 | 24 | 11 | 35 | 37 | 17 | 21 | 17 | 9  | 8  | 18 | 14 | 8  | 11 | 13 | 15 | 16 | 10 | 18 | 12 | 19 | 390 | 4.5     |
| Max (m³/h) | 17 | 27 | 27 | 22 | 25 | 20 | 40 | 37 | 49 | 55 | 52 | 59 | 44 | 61 | 51 | 95 | 92 | 64 | 65 | 28 | 31 | 20 | 29 | 20 |     |         |
| Max (L/s)  | 5  | 7  | 7  | 6  | 7  | 6  | 11 | 10 | 14 | 15 | 14 | 16 | 12 | 17 | 14 | 26 | 26 | 18 | 18 | 8  | 9  | 5  | 8  | 5  |     |         |

- Fondo violetto: l'impianto geotermico viene usato per riscaldare (inverno), quindi scarica acqua fredda
- Fondo arancione: l'impianto serve per raffreddare, quindi scarica acqua calda

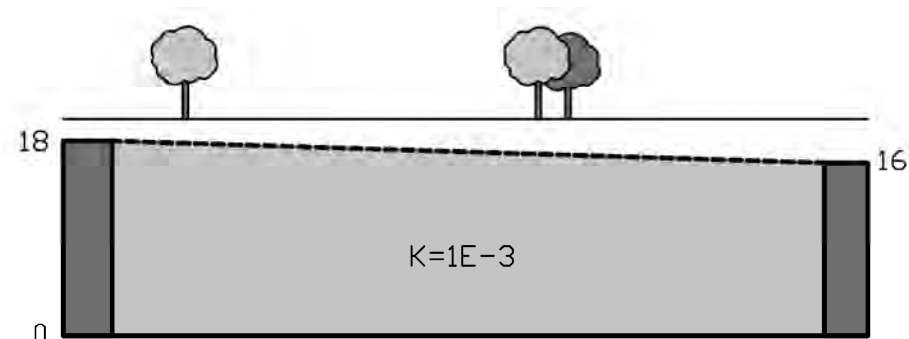
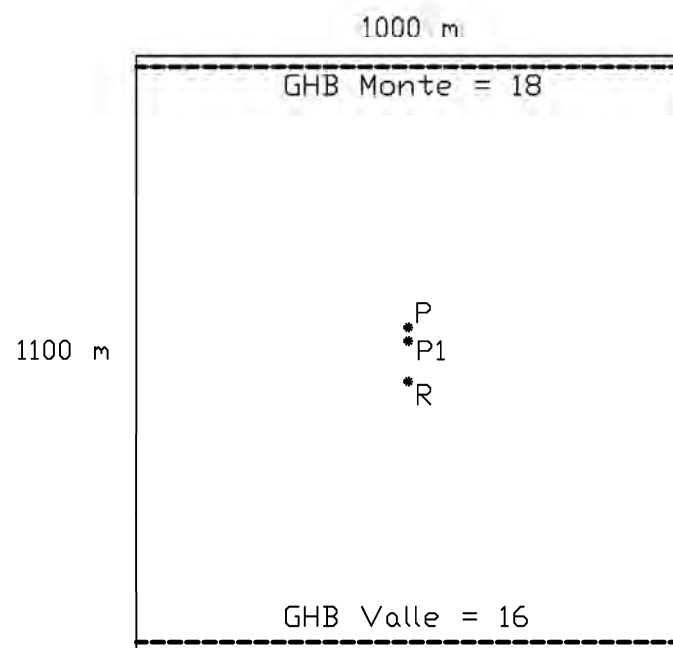
# Approcci al calcolo del $\Delta h$

| Ora        | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | TOT | Q (L/s) |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|---------|
| GENNAIO    | 9  | 18 | 23 | 13 | 16 | 19 | 40 | 28 | 22 | 27 | 35 | 23 | 8  | 19 | 7  | 15 | 13 | 19 | 12 | 11 | 19 | 20 | 27 | 16 | 460 | 5.3     |
| FEBBRAIO   | 13 | 27 | 27 | 22 | 25 | 20 | 25 | 37 | 16 | 19 | 13 | 9  | 10 | 9  | 18 | 13 | 12 | 10 | 13 | 31 | 15 | 29 | 20 |    | 457 | 5.3     |
| MARZO      | 8  | 8  | 19 | 15 | 10 | 19 | 21 | 20 | 28 | 22 | 16 | 7  | 8  | 6  | 9  | 4  | 10 | 9  | 17 | 21 | 12 | 10 | 18 |    | 328 | 3.8     |
| APRILE     | 6  | 4  | 8  | 8  | 10 | 11 | 18 | 9  | 17 | 16 | 6  | 8  | 4  | 14 | 12 | 6  | 10 | 8  | 3  | 12 | 14 | 12 | 13 | 5  | 232 | 2.7     |
| MAGGIO     | 4  | 1  | 1  | 3  | 2  | 2  | 3  | 7  | 13 | 8  | 10 | 8  | 35 | 16 | 27 | 35 | 32 | 25 | 18 | 6  | 9  | 7  | 3  | 5  | 279 | 3.2     |
| GIUGNO     | 4  | 3  | 5  | 2  | 2  | 3  | 7  | 8  | 22 | 27 | 16 | 37 | 44 | 61 | 27 | 50 | 58 | 24 | 35 | 12 | 6  | 8  | 7  | 7  | 475 | 5.5     |
| LUGLIO     | 12 | 9  | 10 | 7  | 13 | 5  | 5  | 17 | 49 | 55 | 52 | 59 | 37 | 43 | 31 | 95 | 92 | 36 | 40 | 28 | 9  | 8  | 8  | 19 | 737 | 8.5     |
| AGOSTO     | 7  | 8  | 10 | 9  | 10 | 3  | 4  | 27 | 39 | 31 | 26 | 36 | 44 | 38 | 51 | 64 | 63 | 64 | 65 | 24 | 5  | 7  | 7  | 15 | 657 | 7.6     |
| SETTEMBRE  | 5  | 4  | 6  | 4  | 6  | 2  | 3  | 8  | 16 | 20 | 23 | 46 | 27 | 31 | 24 | 56 | 28 | 35 | 33 | 6  | 4  | 5  | 2  | 4  | 398 | 4.6     |
| OTTOBRE    | 4  | 6  | 8  | 4  | 5  | 5  | 7  | 7  | 6  | 13 | 15 | 14 | 16 | 36 | 21 | 31 | 27 | 20 | 27 | 6  | 6  | 7  | 3  | 5  | 298 | 3.5     |
| NOVEMBRE   | 15 | 6  | 10 | 10 | 13 | 10 | 10 | 18 | 16 | 17 | 24 | 9  | 12 | 21 | 12 | 7  | 20 | 19 | 11 | 21 | 13 | 8  | 9  | 12 | 323 | 3.7     |
| DICEMBRE   | 17 | 10 | 8  | 22 | 24 | 11 | 35 | 37 | 17 | 21 | 17 | 9  | 8  | 18 | 14 | 8  | 11 | 13 | 15 | 16 | 10 | 18 | 12 | 19 | 390 | 4.5     |
| Max (m³/h) | 17 | 27 | 27 | 22 | 25 | 20 | 40 | 37 | 49 | 55 | 52 | 59 | 44 | 61 | 51 | 95 | 92 | 64 | 65 | 28 | 31 | 20 | 29 | 20 |     |         |
| Max (L/s)  | 5  | 7  | 7  | 6  | 7  | 6  | 11 | 10 | 14 | 15 | 14 | 16 | 12 | 17 | 14 | 26 | 26 | 18 | 18 | 8  | 9  | 5  | 8  | 5  |     |         |

- Modello stazionario con Q max ( $95 \text{ m}^3/\text{h} = 26.4 \text{ L/s}$ );
- Modello stazionario con media dei picchi cioè  $(95+92)/2$  oppure  $(51+64+63+64+65+24)/6$ ;
- Modello stazionario con media del mese più critico (luglio, con 8.5 L/s);
- Modello transitorio su base annua (12 stress period, uno per mese) con individuazione del periodo peggiore;
- Modello transitorio con mese peggiore poi 2-3 giorni su base oraria;
- Altro...

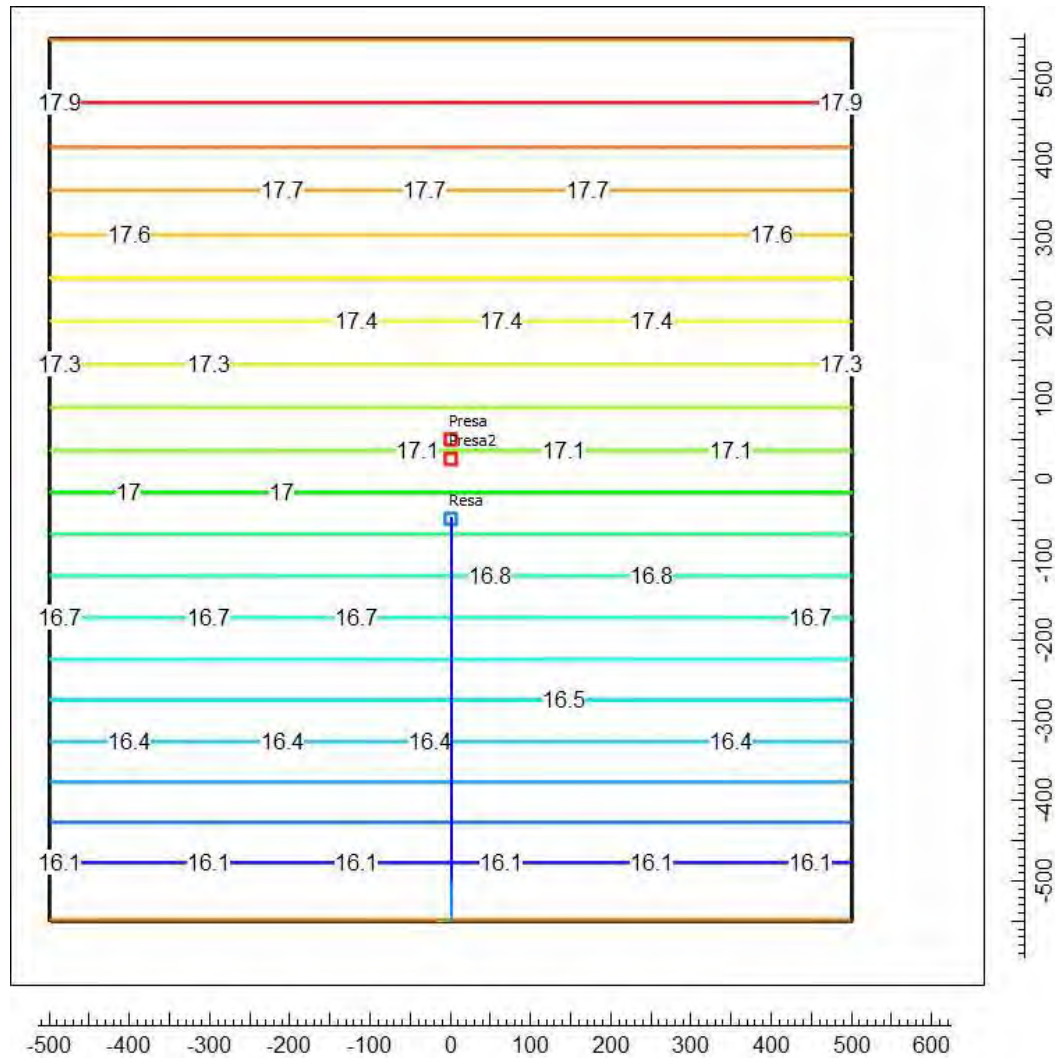
Partire sempre dallo scenario più cautelativo: se quello è verificato è già un valido punto di partenza. Poi farne qualche altro, anche per capire bene cosa succede.

## Schema del modello semplificato



$$Q = KiA = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2}{1050} \cdot 1000 \cdot 17 = 3.23 \cdot 10^{-2}$$

## Schema del modello semplificato



Condizione iniziale: pozzi spenti  
e  $i=2 \cdot 10^{-3}$

Mod: 1\_esempio\_deltah\_V1  
Head\_P1\_S1

## Il postprocessore Modpath

The screenshot shows the 'MODFLOW Packages and Programs' dialog box. On the left, a tree view lists various packages: Flow Packages, Boundary conditions, Solvers, Subsidence, Observations, Output, Surface-Water Routing, Post processors, and MODPATH (which is selected and highlighted in blue). Below 'Post processors', 'ZONEBUDGET' and 'MT3DMS or MT3D-U' are also listed. The main area of the dialog is titled 'MODPATH' and contains a 'Comments' text box. Below this, there are three tabs: 'Simulation file options', 'Version 6 & 7 options', and 'Output times'. The 'Simulation file options' tab is active. It contains several settings: 'Modpath version' with radio buttons for 5, 6 (selected), and 7; 'Output mode (SimulationType)' with radio buttons for End points, Pathlines (selected), Time series, and Pathlines + Time series; 'Top face' dropdowns for 'Treatment of evapotranspiration (IEVTTP)' and 'Treatment of recharge (IRCHTP)'; a checkbox for 'Use zone arrays (ZoneArrayOption)'; a text box for 'Reference time for simulation (ReferenceTime)' with the value 0; a dropdown for 'Which endpoints should be recorded?' with the value All; a text box for 'Zone in which to stop particles (StopZone)' with the value 0; a dropdown for 'Treatment of weak sinks (WeakSinkOption)' with the value Pass through; a text box for 'Weak sink fractional threshold' with the value 0; and a dropdown for 'Tracking direction (TrackingDirection)' with the value Forward. At the bottom right, there are three buttons: '? Help', 'OK', and 'Cancel'.

MODFLOW Packages and Programs

MODPATH

Comments

Simulation file options | Version 6 & 7 options | Output times

Modpath version  
☐ 5 ☒ 6 ☐ 7

Output mode (SimulationType)  
☐ End points ☐ Time series  
☒ Pathlines ☐ Pathlines + Time series

Top face Treatment of evapotranspiration (IEVTTP)

Top face Treatment of recharge (IRCHTP)

☐ Use zone arrays (ZoneArrayOption)

Reference time for simulation (ReferenceTime)  
0

Which endpoints should be recorded?  
All

0 Zone in which to stop particles (StopZone)

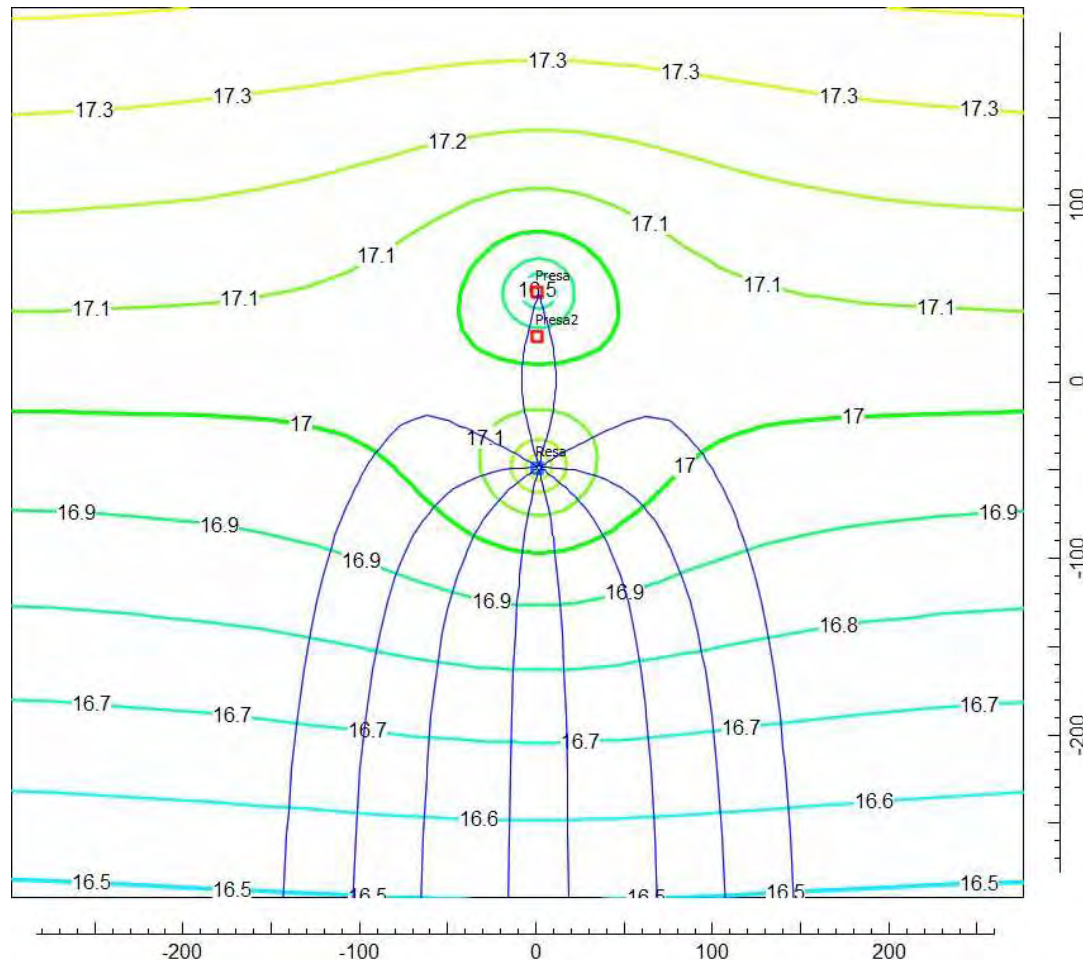
Treatment of weak sinks (WeakSinkOption)  
Pass through

Tracking direction (TrackingDirection)  
Forward

0 Weak sink fractional threshold

? Help OK Cancel

## Schema del modello semplificato

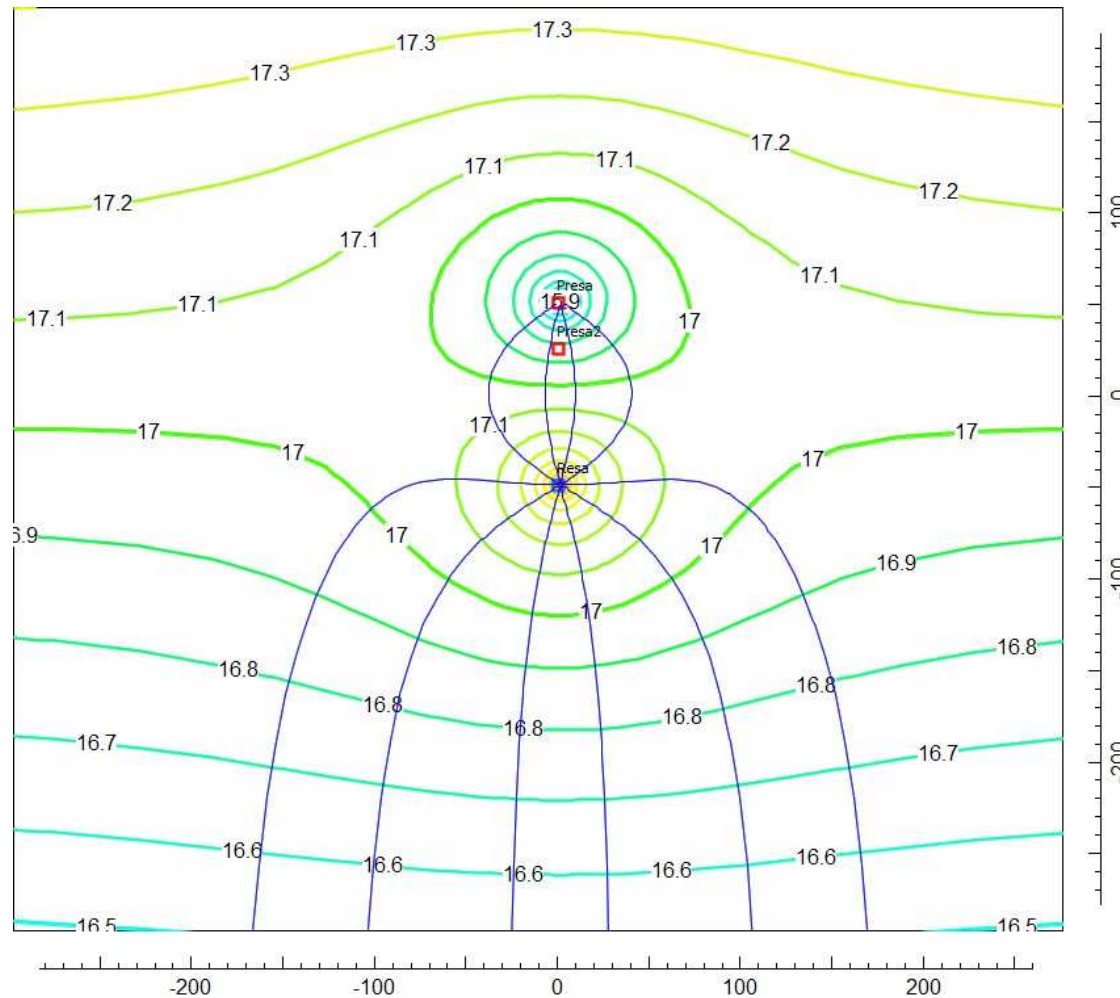


Condizioni stazionarie:  $Q=15 \text{ L/s}$   
e  $i=2 \cdot 10^{-3}$

Andamento della piezometria

Mod: 1\_esempio\_deltah\_V1  
Head\_P1\_S1\_1

## Schema del modello semplificato

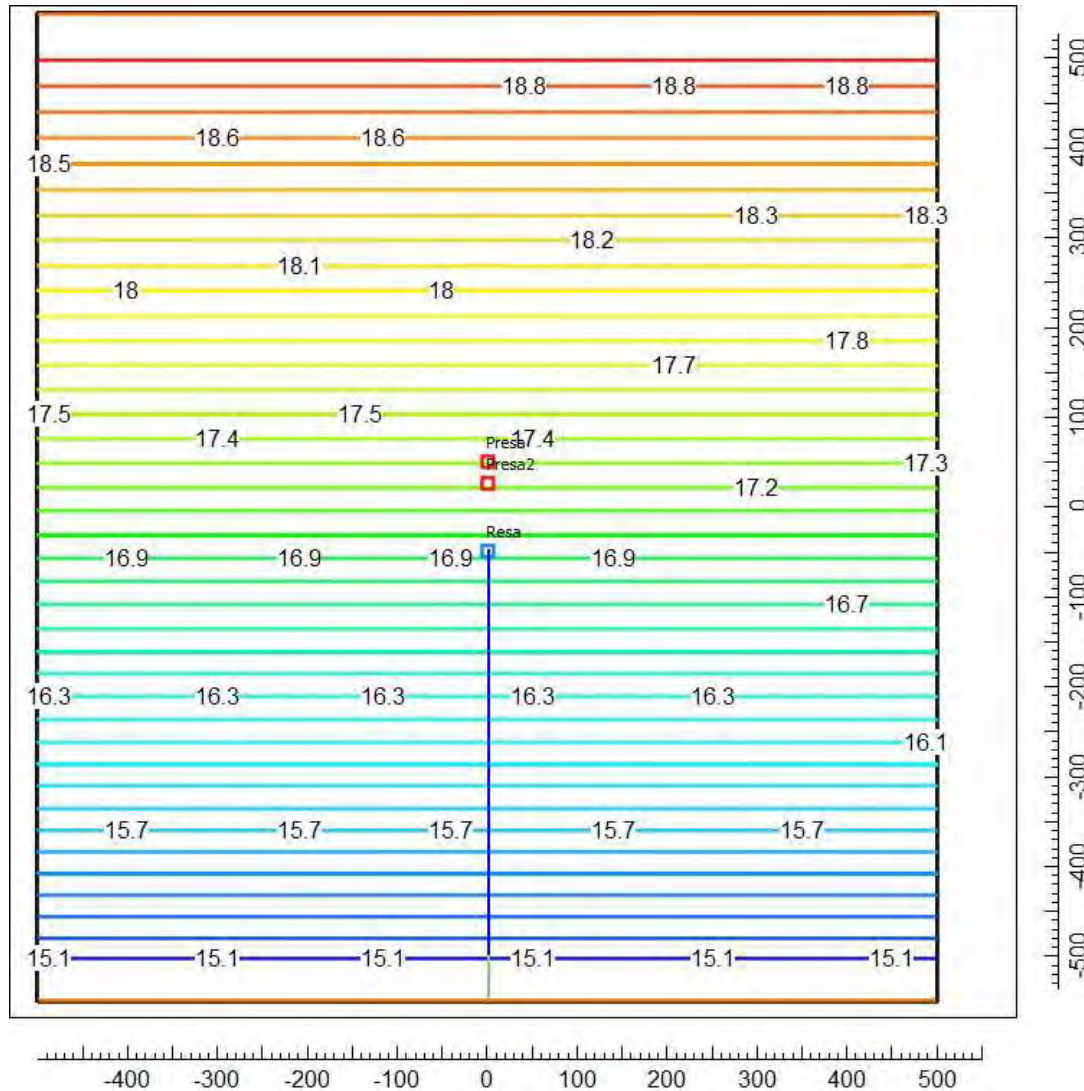


Condizioni stazionarie:  $Q=25 \text{ L/s}$   
e  $i=2 \cdot 10^{-3}$

Andamento della piezometria

Mod: 1\_esempio\_deltah\_V1  
Head\_P1\_S1\_2

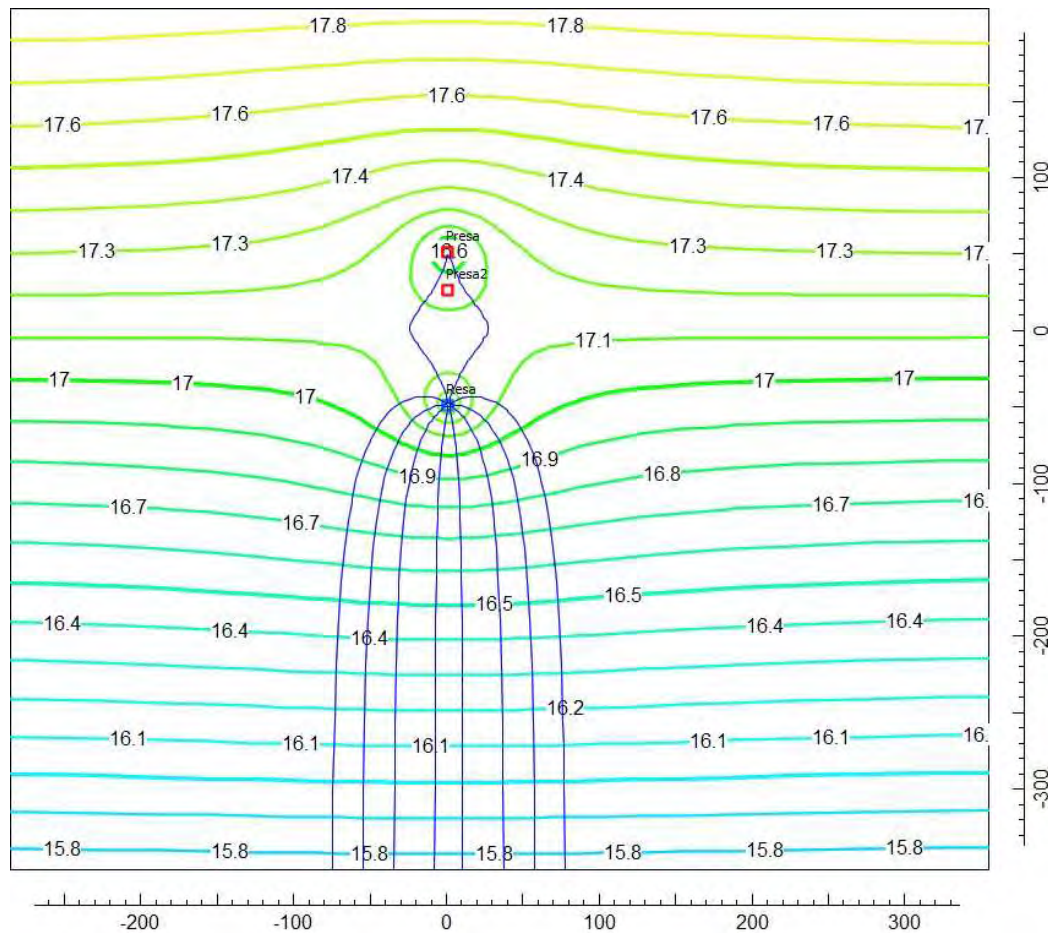
# Schema del modello semplificato



Condizione iniziale: pozzi spenti  
e  $i=4 \cdot 10^{-3}$   
 $Q=6.46 \cdot 10^{-2}$

Mod: 1\_esempio\_deltah\_V1  
Head\_P1\_S1\_3

## Schema del modello semplificato

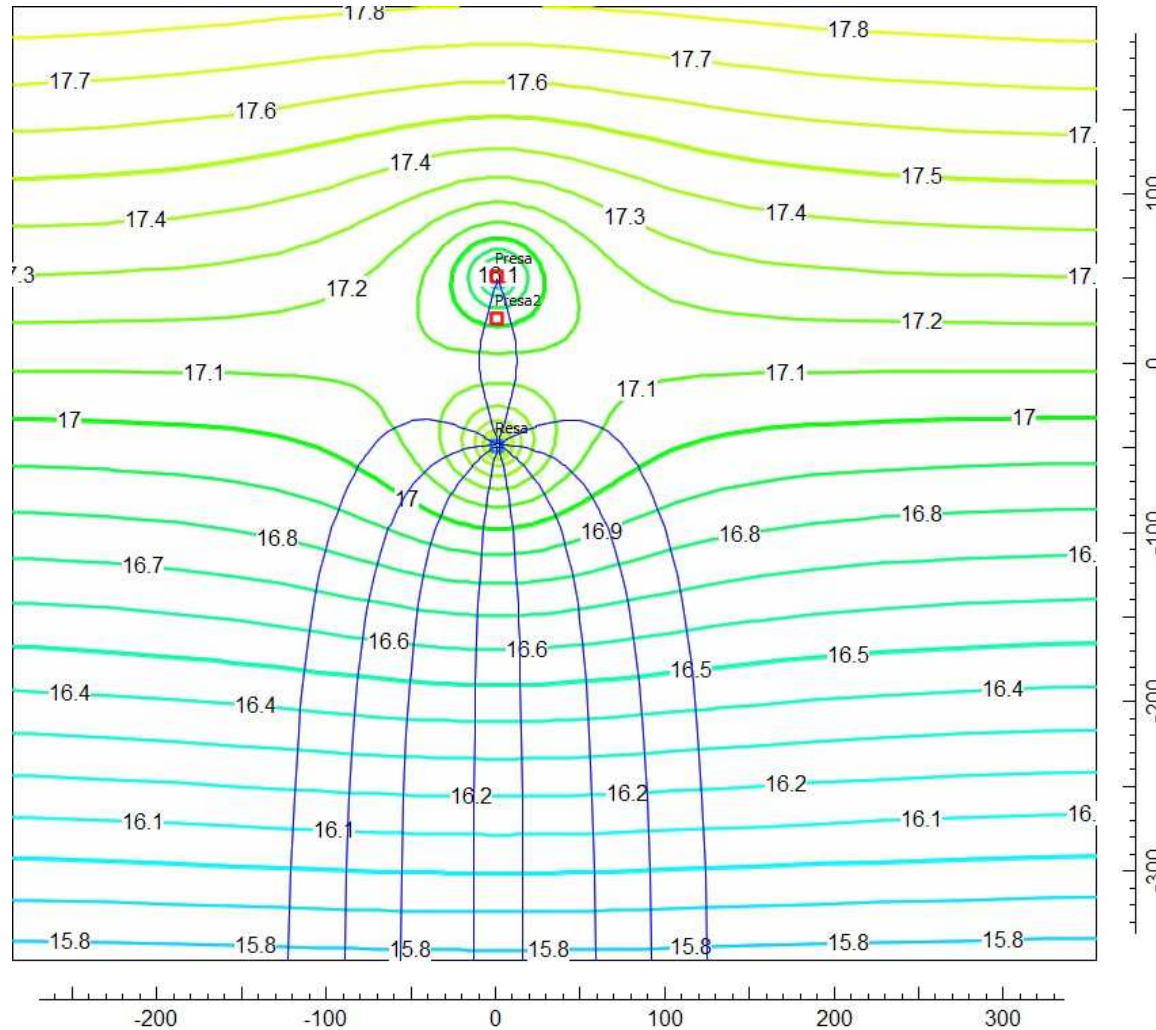


Condizioni stazionarie:  $Q=15 \text{ L/s}$   
e  $i=4 \cdot 10^{-3}$

Andamento della piezometria

Mod: 1\_esempio\_deltah\_V1  
Head\_P1\_S1\_4

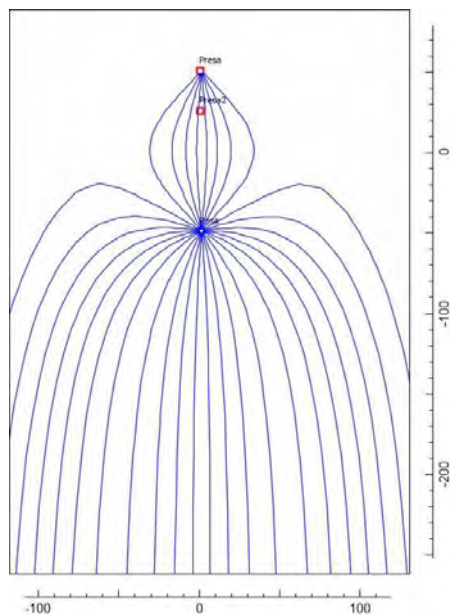
## Schema del modello semplificato



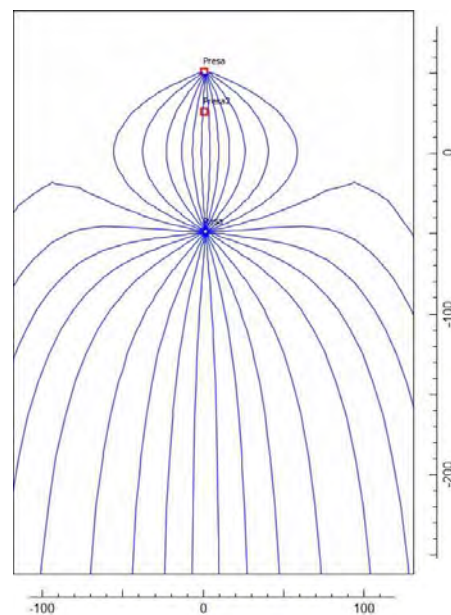
Condizioni stazionarie:  $Q=25 \text{ L/s}$   
e  $i=4 \cdot 10^{-3}$

Andamento della piezometria

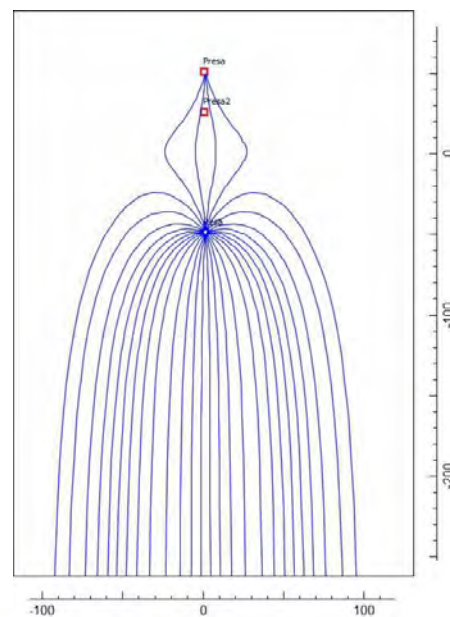
Mod: 1\_esempio\_deltah\_V1  
Head\_P1\_S1\_5



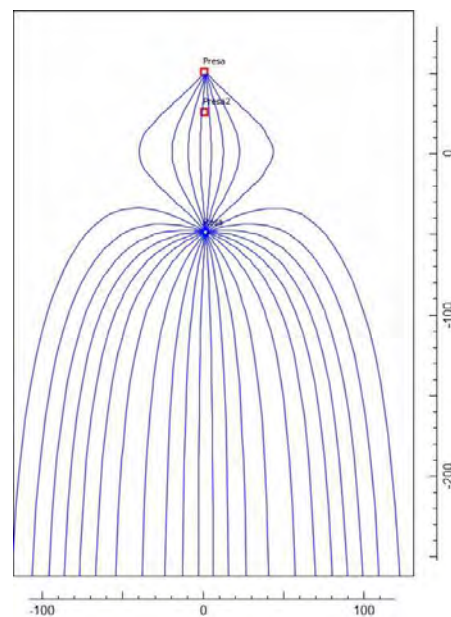
$Q=15 \text{ L/s};$   
 $i=2 \cdot 10^{-3}$



$Q=25 \text{ L/s};$   
 $i=2 \cdot 10^{-3}$

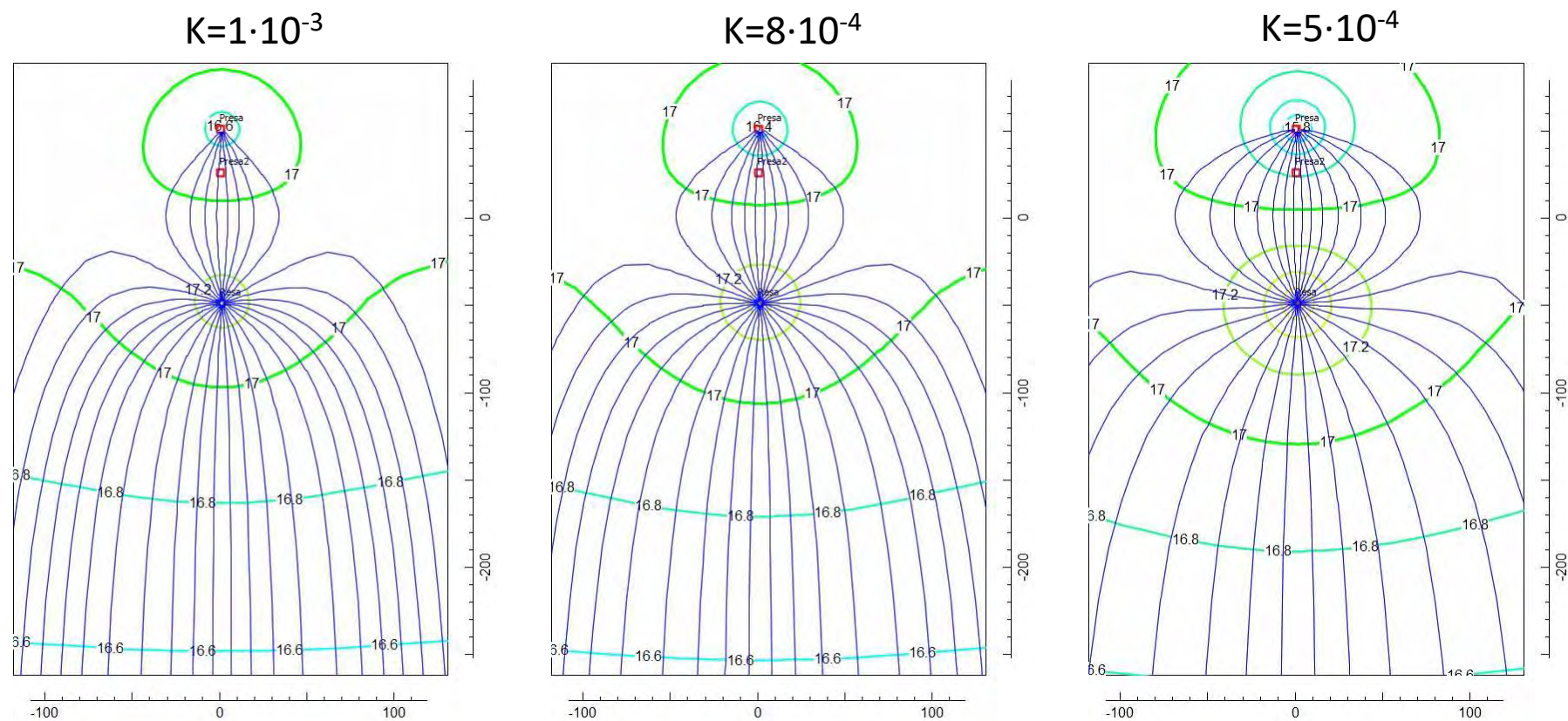


$Q=15 \text{ L/s};$   
 $i=4 \cdot 10^{-3}$



$Q=25 \text{ L/s};$   
 $i=4 \cdot 10^{-3}$

# Il ruolo della conducibilità idraulica

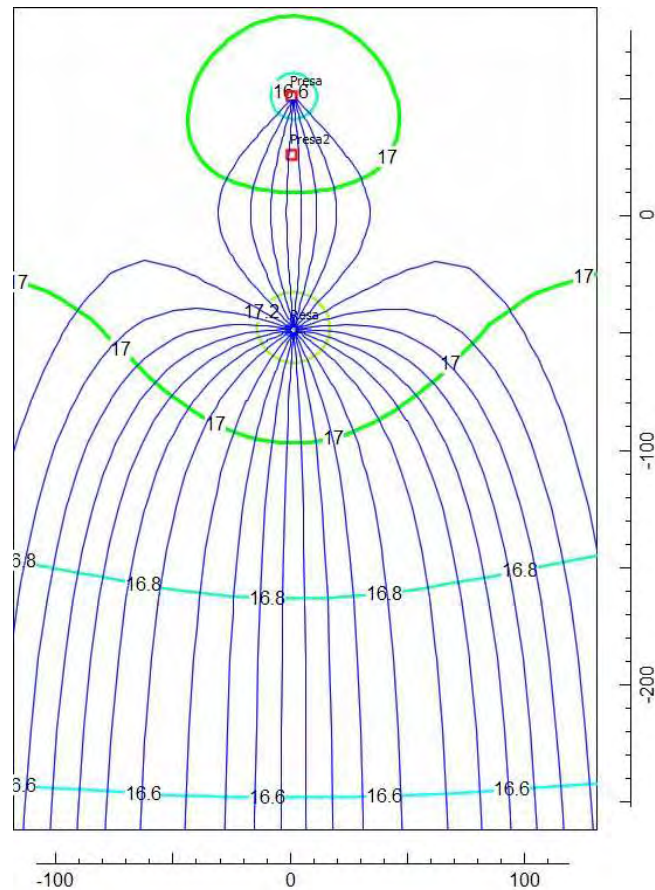


Condizioni per tutti i modelli:  $i=2 \cdot 10^{-3}$  e  $Q=0.015 \text{ m}^3/\text{s}$

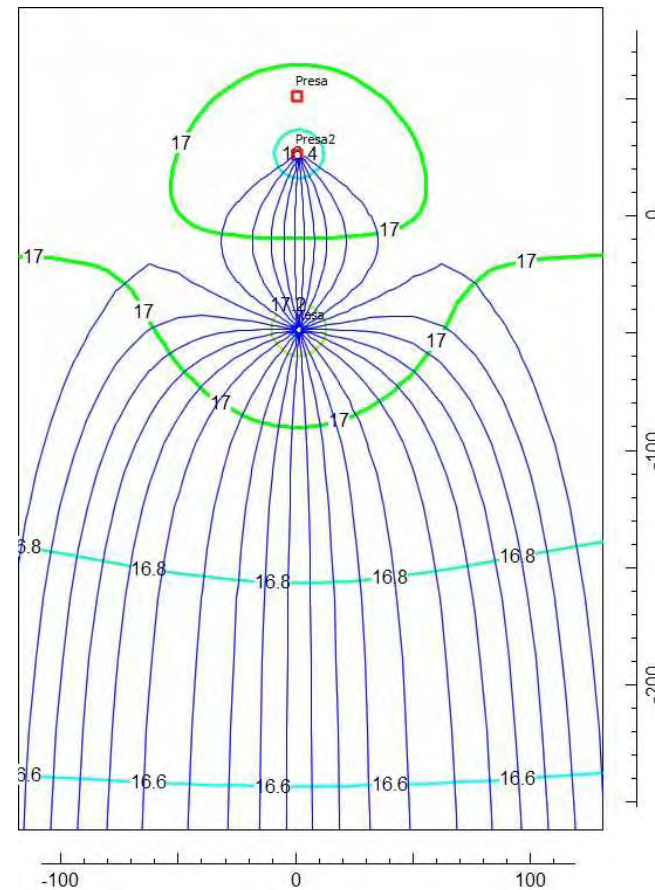
# Distanza delle aree di presa e di resa



Pozzi a 100 m di distanza

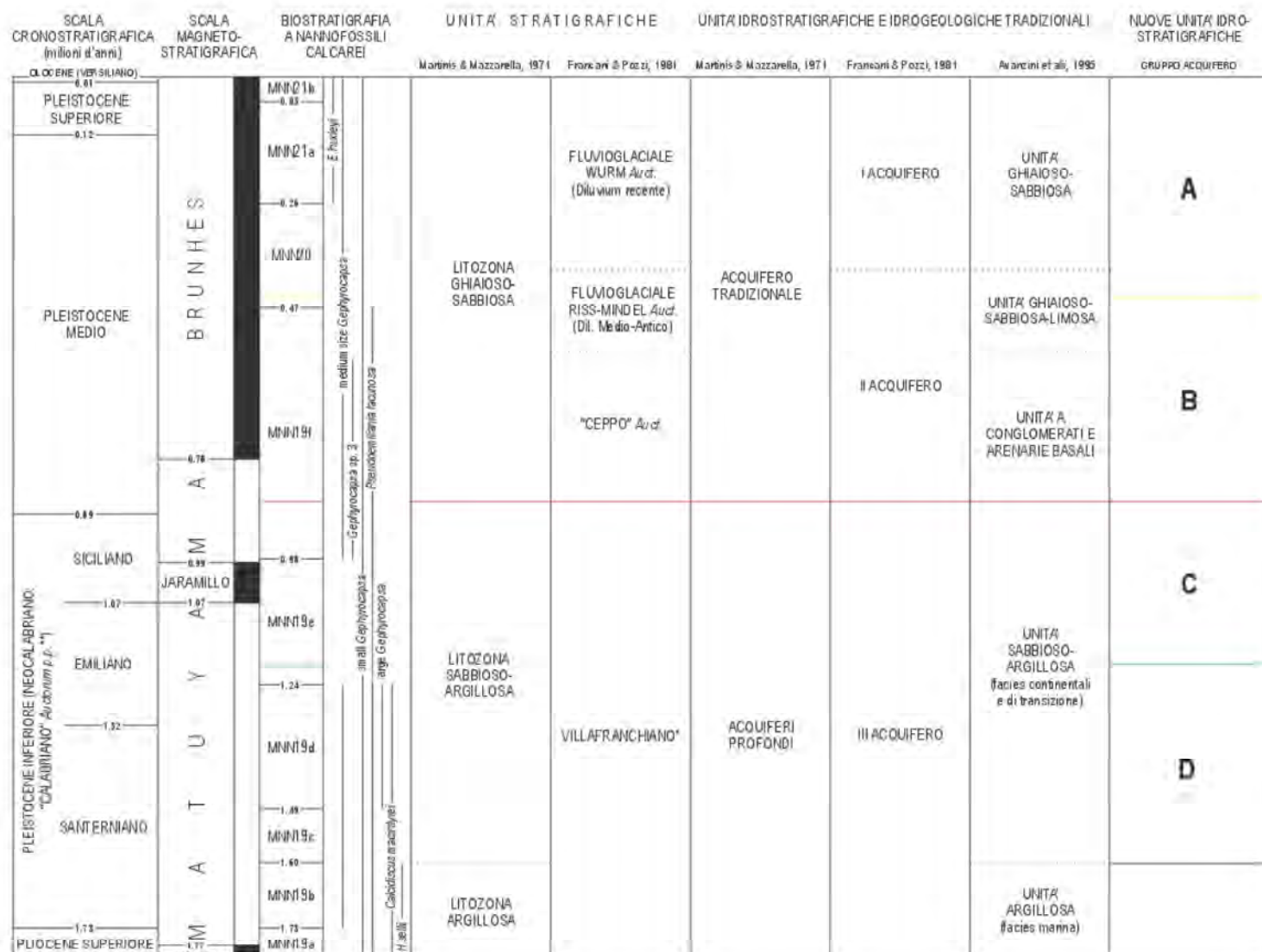


Pozzi a 75 m di distanza



Condizioni per tutti i modelli:  $i=2 \cdot 10^{-3}$ ,  $Q=0.015 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $K=1 \cdot 10^{-3}$

# Problema reale – Inquadramento generale

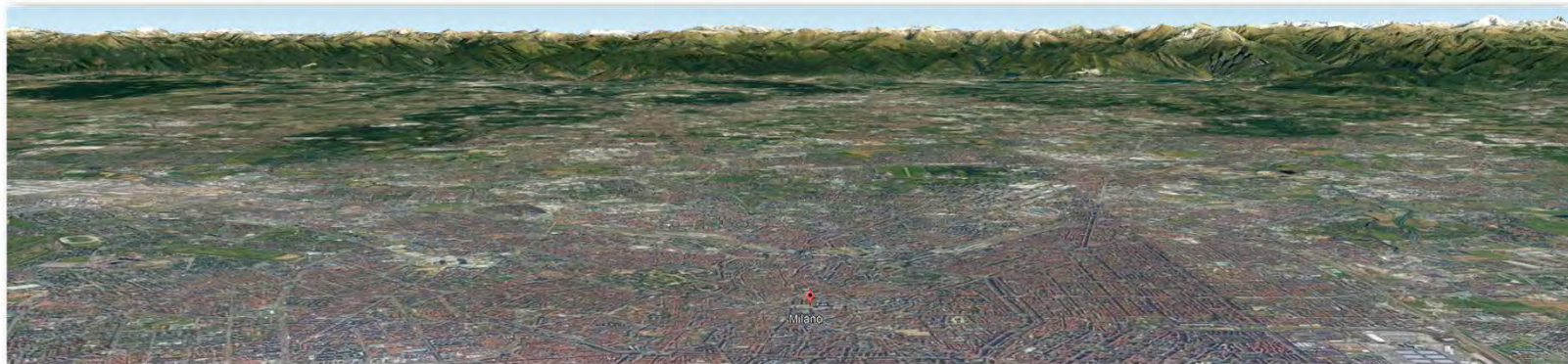


## Problema reale – Inquadramento generale

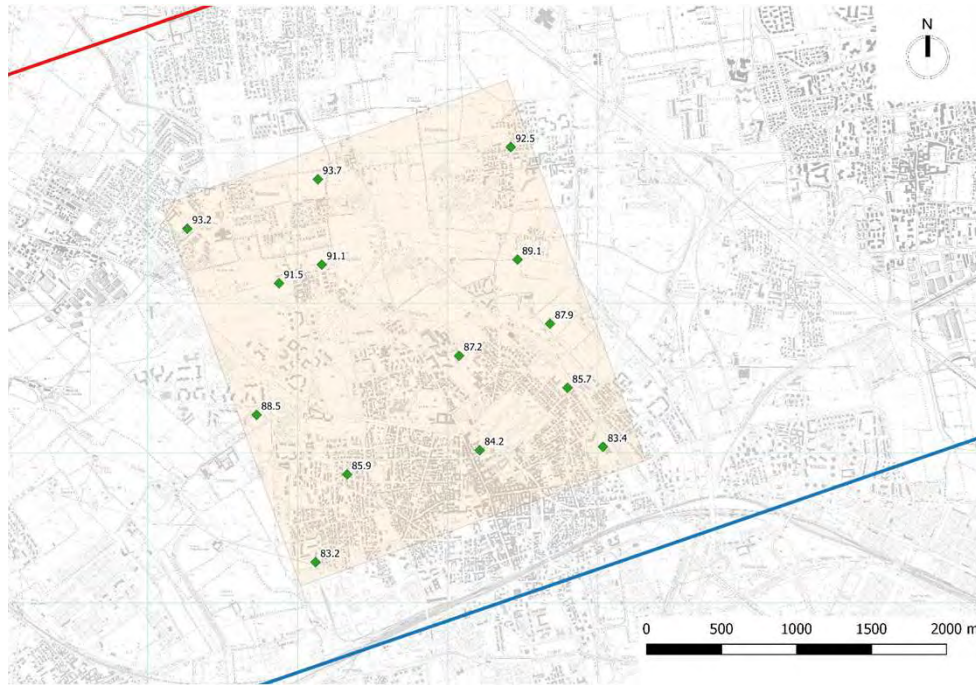
L'Unità A corrisponde al 1° Acquifero, la B al 2° acquifero, la C e D al 3° Acquifero.  
A livello molto generale la trasmissività dell'Unità B è compresa tra  $5 \cdot 10^{-3}$  e  $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , anche se si possono avere valori più elevati in corrispondenza di paleoalvei fluviali o notevolmente più bassi laddove prevalgono le granulometrie sabbiose.

Nell'area della media pianura i valori di trasmissività dell'acquifero A sono di circa  $2 \cdot 10^{-2}$  –  $4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ; questi si mantengono relativamente elevati anche procedendo verso i settori più meridionali della Provincia di Milano, nonostante una progressiva diminuzione della granulometria, dove si riscontra una trasmissività di  $8 \cdot 10^{-3}$  -  $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ .

I pozzi geotermici saranno perforati nell'Unità A che litologicamente è costituita da sedimenti Ghiaioso sabbiosi.



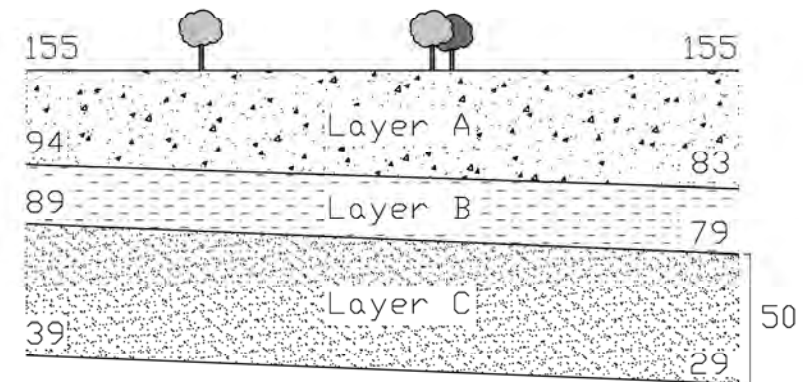
# Problema reale – Inquadramento generale



Per tutti gli acquiferi:  $S_y = n_e = 0.2$ ;  $S_s = 1E-5 \text{ m}^{-1}$ .

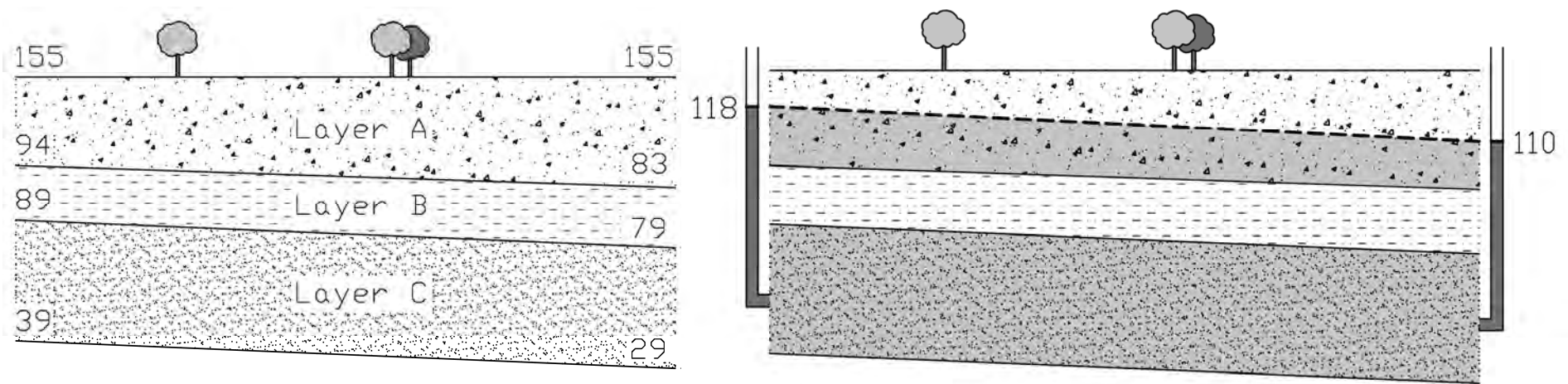
Il piano campagna è considerato orizzontale ed a quota di 155 m s.l.m.

Nell'area sono stati eseguiti, per altri scopi, una serie di sondaggi che hanno consentito di individuare la base dell'acquifero A



| Acquifero      | Layer | $K_v = K_y$          | $K_x$    |
|----------------|-------|----------------------|----------|
| Acquifero A    | 1     | 0.0012 m/s           | $K_h/10$ |
| Separazione AB | 2     | $5.2E-6 \text{ m/s}$ | $K_h/10$ |
| Acquifero B    | 3     | 0.00045 m/s          | $K_h/10$ |

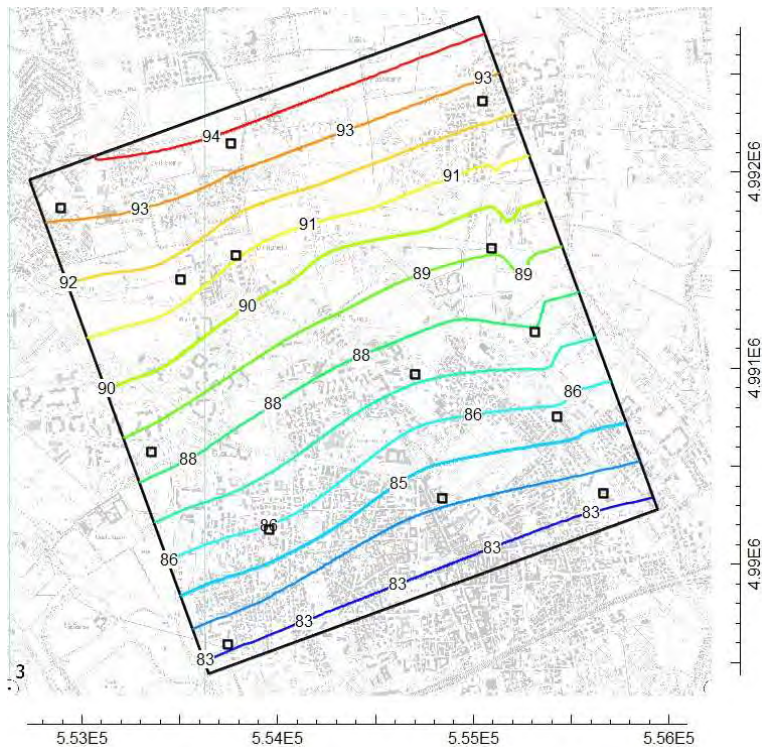
## Problema reale - Piezometria



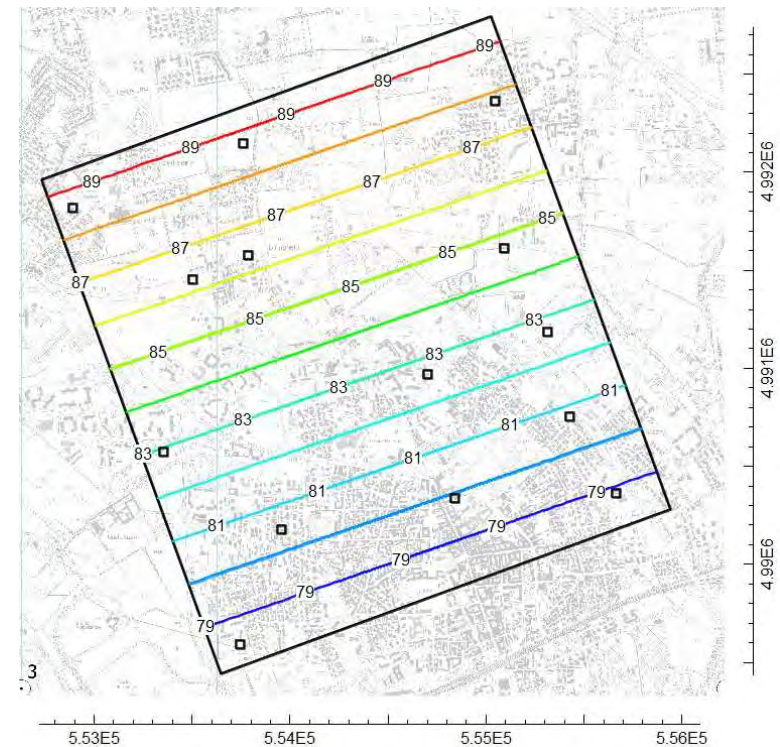
| Acquifero      | Layer | $K_x=K_y$    | $K_z$    |
|----------------|-------|--------------|----------|
| Acquifero A    | 1     | 0.0012 m/s   | $K_h/10$ |
| Separazione AB | 2     | $5.2E-6$ m/s | $K_h/10$ |
| Acquifero B    | 3     | 0.00045 m/s  | $K_h/10$ |

# Problema reale – Quote del bottom dei layer del modello

Piano campagna: orizzontale a 155 m s.l.m.



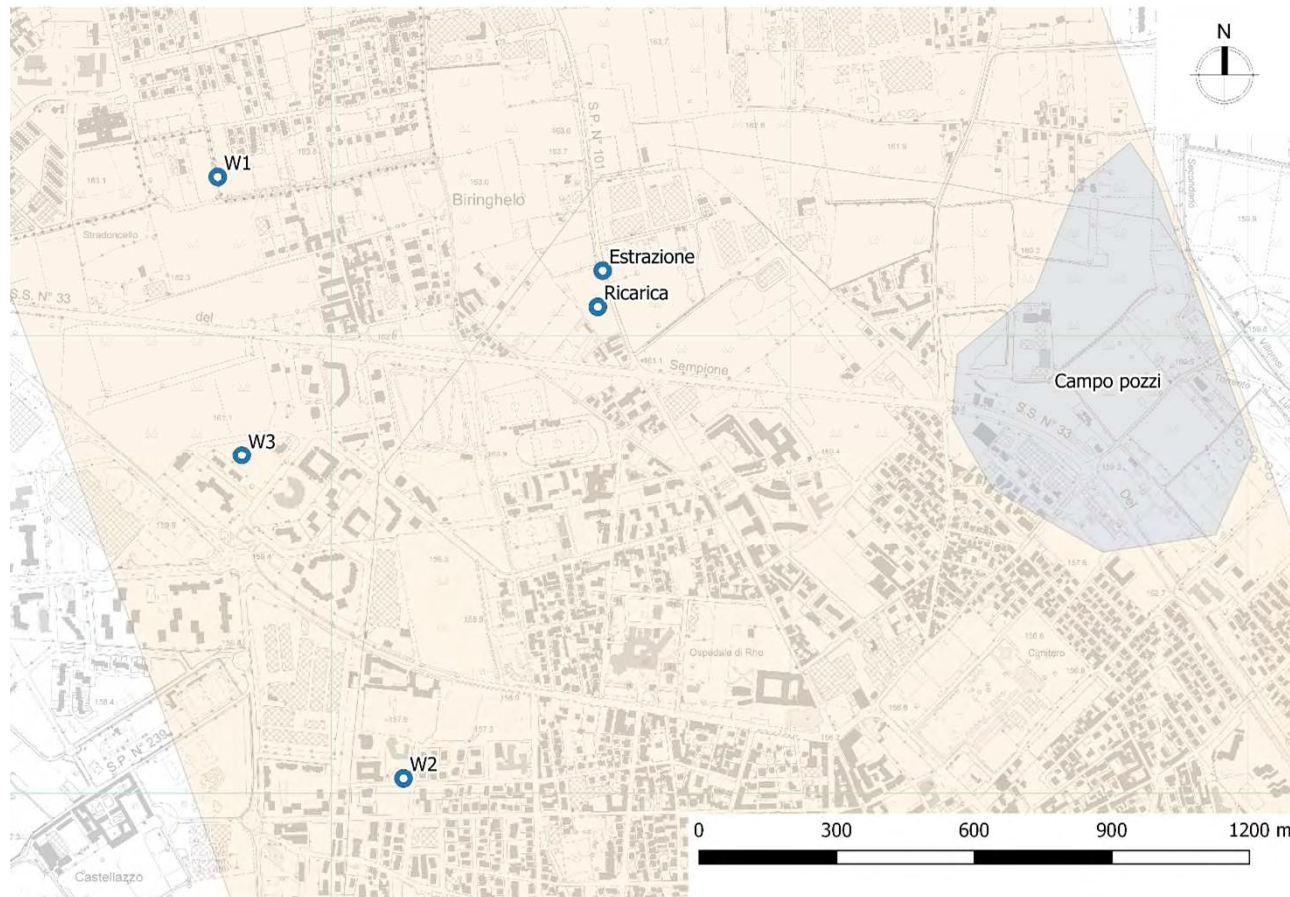
Base acquifero A



Base acquifero B

Spessore acquifero C: 50 m, costante.

## Problema reale – Pozzi e campi pozzi attivi



I pozzi e il campo pozzi si assumono funzionanti ininterrottamente con portata costante. La temperatura dell'acqua di falda si assume costante nell'arco dell'anno ed uguale a 15 °C.

| Punto    | W1<br>(acquifero A) | W2<br>(acquifero A) | W3<br>(acquifero A) | Campo pozzi<br>(acquifero A) | Campo pozzi<br>(acquifero B) |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| Q [m³/s] | -0.004              | -0.0032             | -0.005              | -0.0125                      | -0.117                       |

## Problema reale – Caratteristiche dell'impianto geotermico

L'impianto viene realizzato con **un pozzo di presa e un pozzo di resa**. Tutta l'acqua prelevata viene reimpressa quindi la portata del pozzo di presa è uguale e di segno contrario alla portata del pozzo di resa.

L'impianto **funziona ininterrottamente** tutto l'anno con un **ciclo estivo di 181.12 giorni** e un **ciclo invernale di 184.12 giorni**, con la durata dell'anno medio di 365.25 giorni.

L'impianto ha una **portata di picco di 0.025 m<sup>3</sup>/s**.

La temperatura dell'acqua di falda è di **15 °C**.

La **distanza** fra il pozzo di presa e il pozzo di resa è di circa **80 m**.

| Stagione | Giorni funzionamento   | Q media [m <sup>3</sup> /s] | T immissione [°C] |
|----------|------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Estate   | 181.12 gg = 15649111 s | 0.014                       | 20                |
| Inverno  | 184.12 gg = 15908489 s | 0.007                       | 10                |

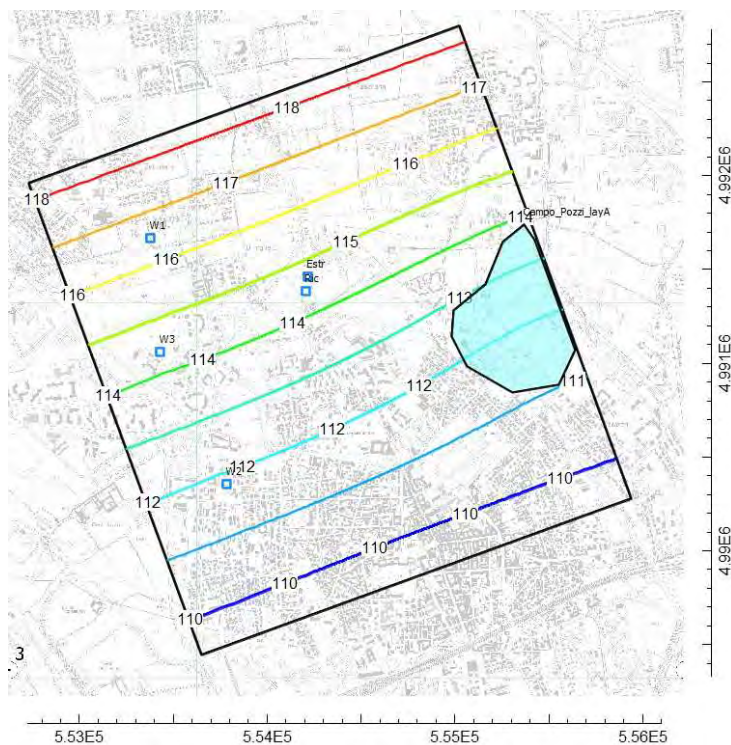
## Problema reale – Scopo dello studio

- esaminare le **oscillazioni piezometriche massime** attorno all'impianto quando questo funziona **alla massima portata**, cioè alla portata di picco;
- valutare le **oscillazioni di temperatura** in corrispondenza del **pozzo di presa**;
- valutare le **sagoma del pennacchio termico**;
- valutare le **oscillazioni di temperatura in 4 punti di controllo**.

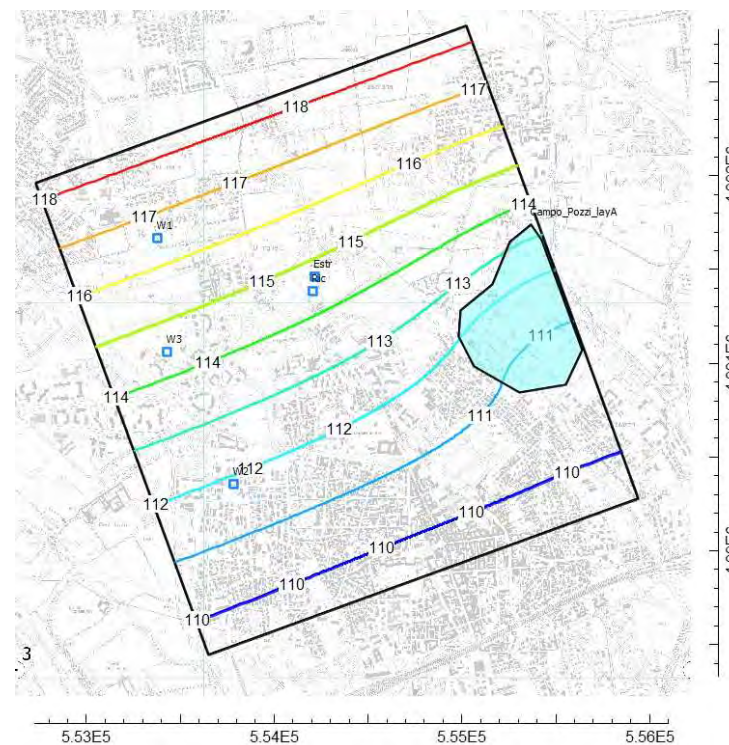


Punti di controllo:  
Pz1, Pz2, Pz3 e Pz4

## Problema reale – Assetto indisturbato (condizioni stazionarie)

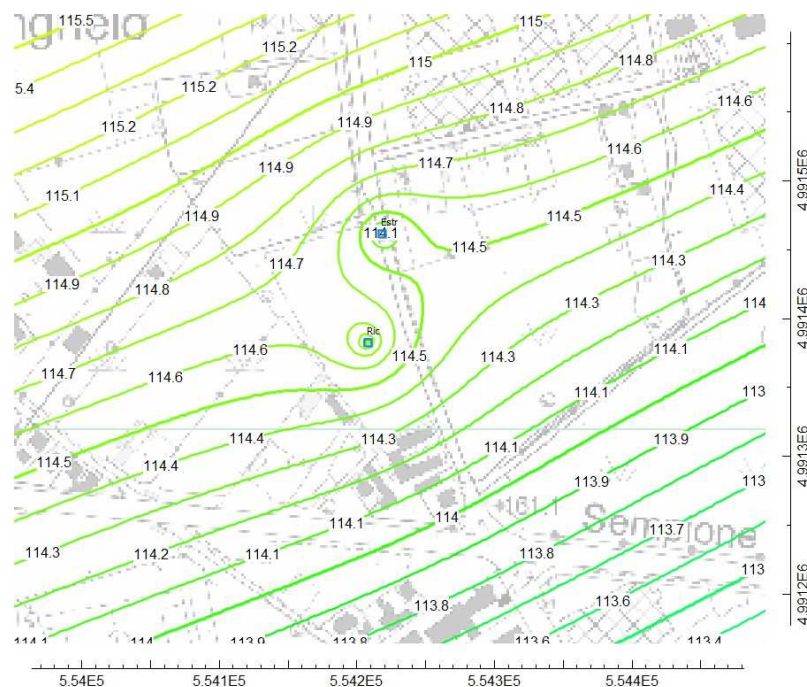


Layer 1 (acquifero A)

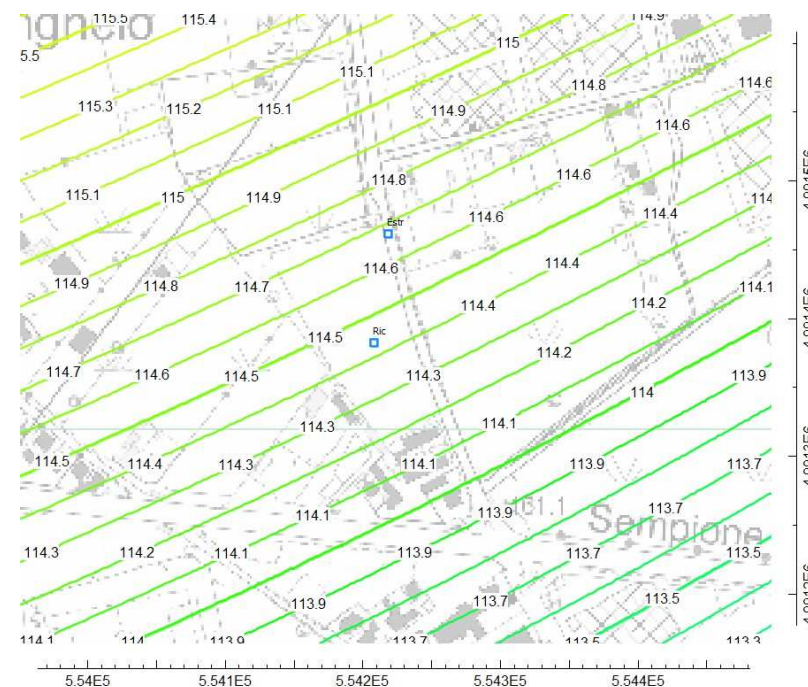


Layer 3 (acquifero B)

## Problema reale – Portata massima (condizioni stazionarie)

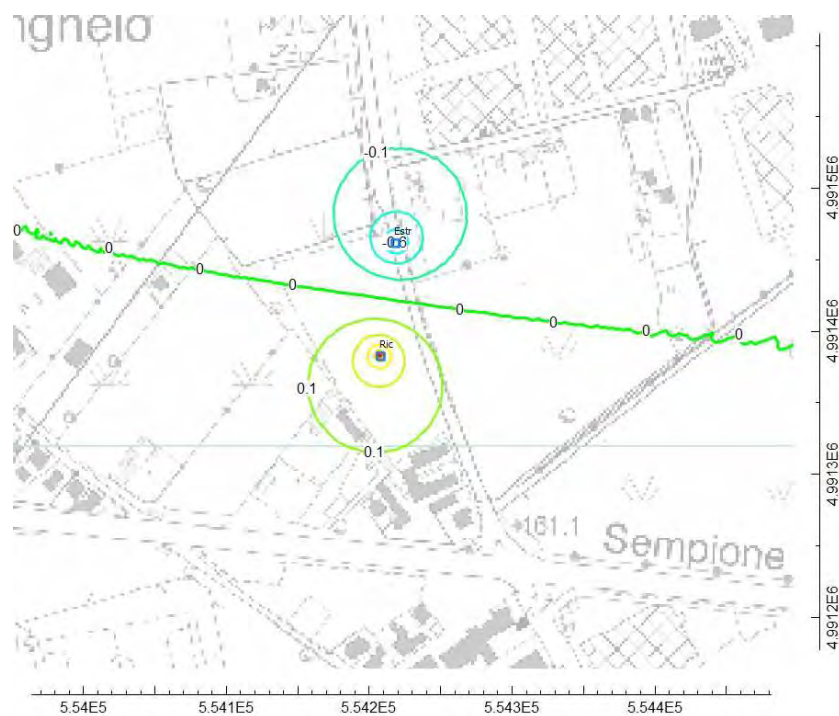


Layer 1 (acquifero A)

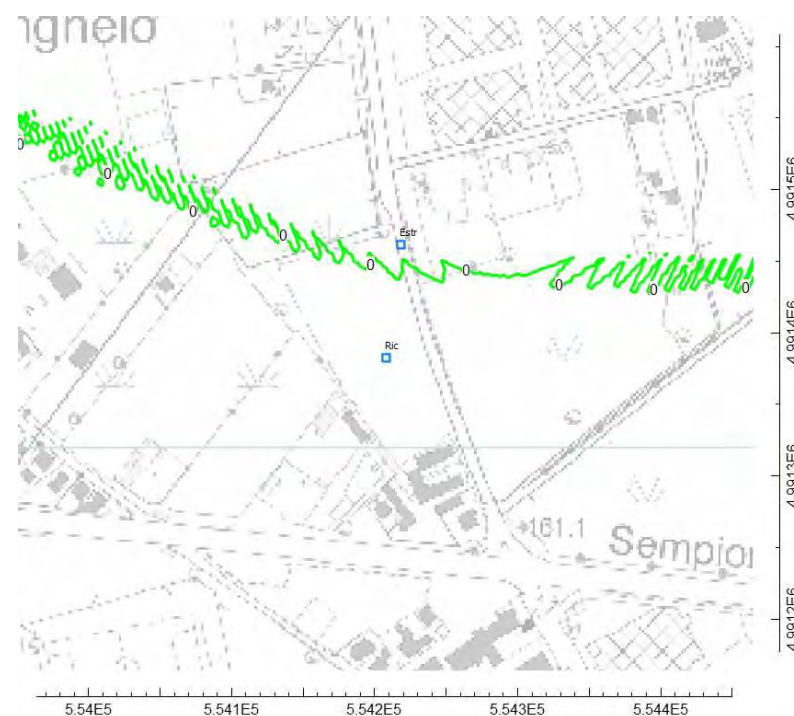


Layer 3 (acquifero B)

## Problema reale – Portata massima $\Delta h$ (condizioni stazionarie)

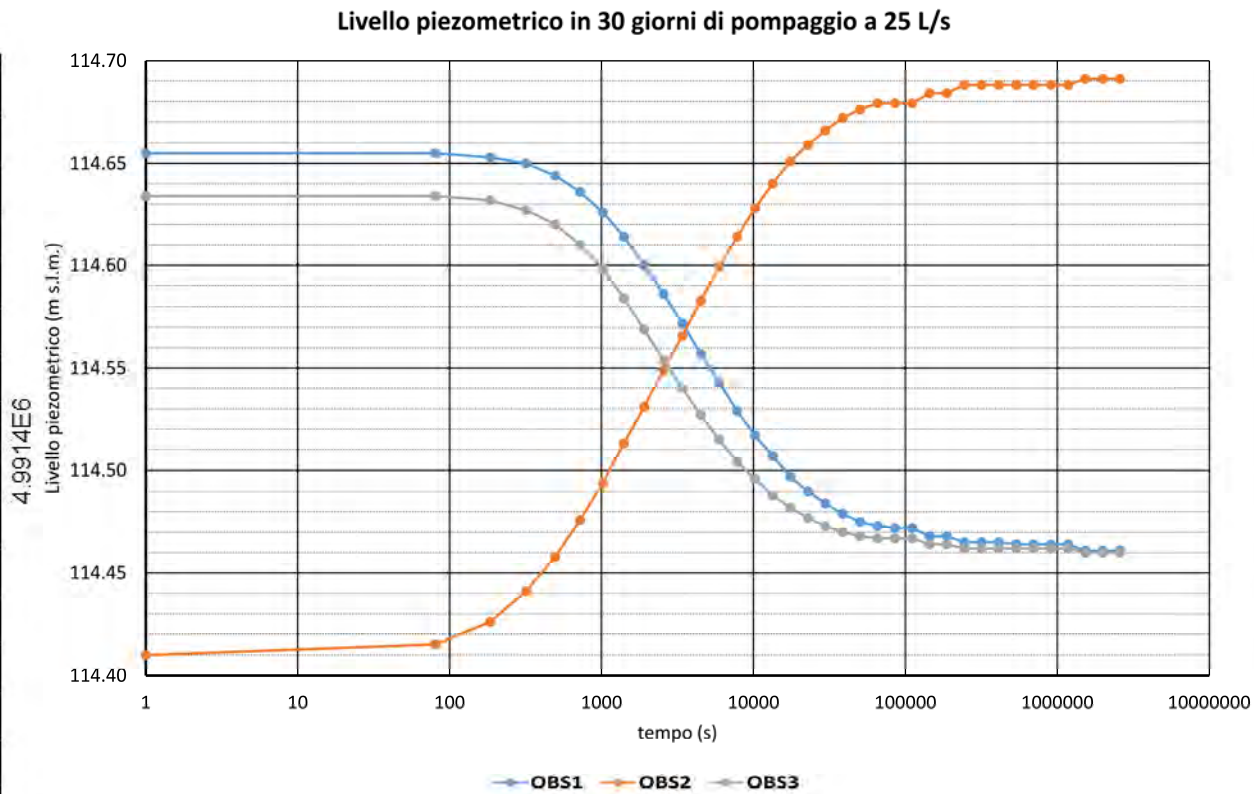
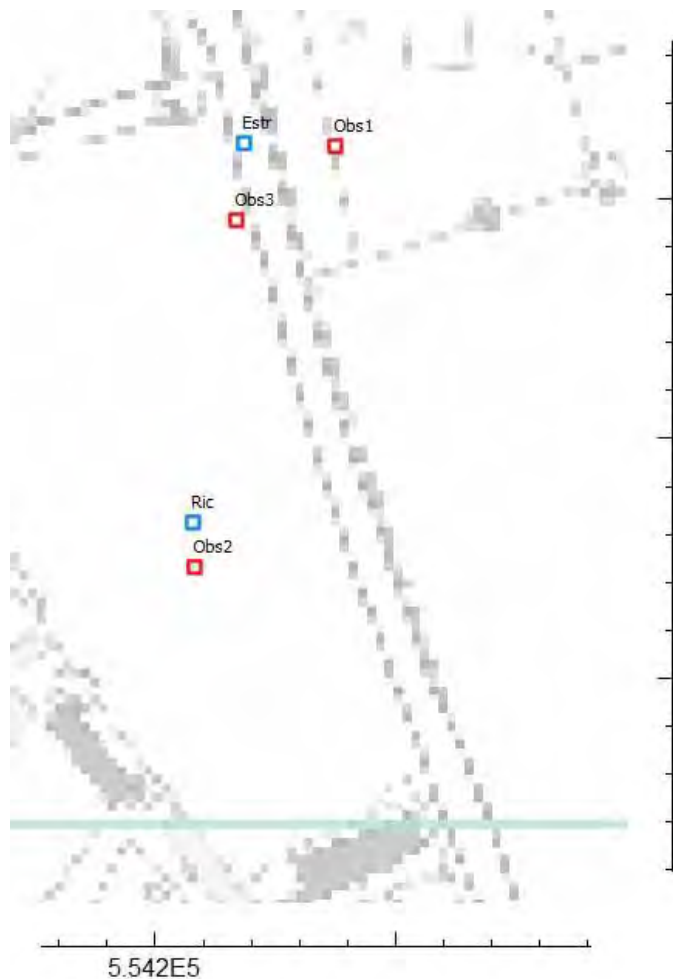


Layer 1 (acquifero A)



Layer 3 (acquifero B)

# Problema reale – Portata massima $\Delta h$ (condizioni transitorie)



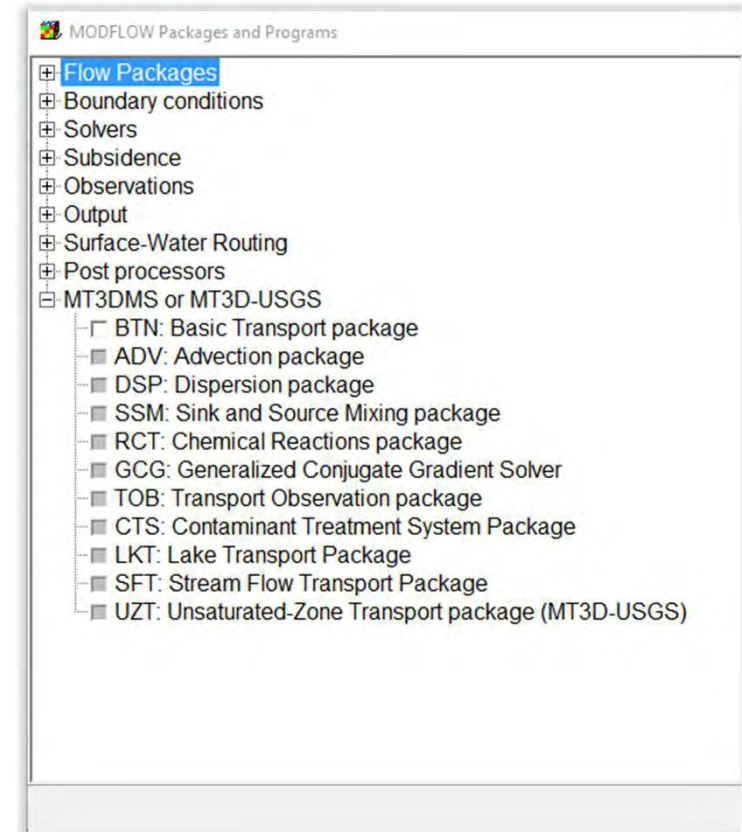
# Il trasporto di calore con MT3DMS

MT3DMS è un codice di calcolo ad architettura modulare che consente la simulazione di avvezione, dispersione e reazioni chimiche di una sostanza che è entrata in soluzione con l'acqua di falda.

Funzionamento concettuale del pacchetto:

MODFLOW -> ricostruisce la distribuzione dei carichi idraulici nel modello

MT3DMS -> legge la distribuzione dei carichi idraulici preventivamente elaborate da MODFLOW e li utilizza per ricostruire la parte della simulazione che corrisponde al trasporto



# Il trasporto di calore con MT3DMS

Effetti che determinano il trasporto di un soluto in acqua

Trasporto per gradiente di concentrazione

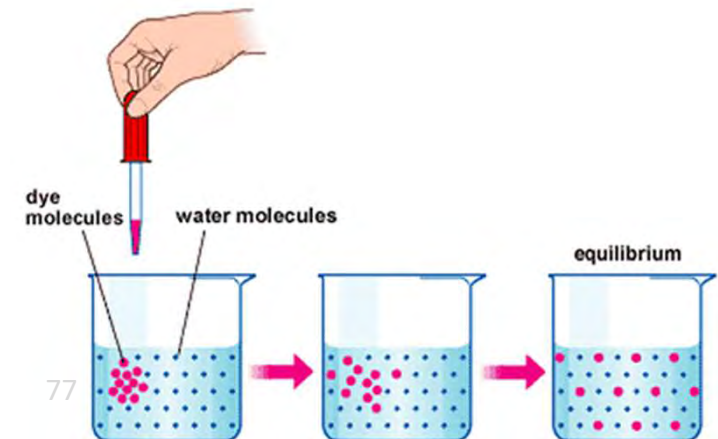
Un soluto in acqua si muoverà da una zona a concentrazione più elevata verso una zona a concentrazione più bassa

Questo processo è conosciuto come **diffusione molecolare** o **diffusione**.

Nel caso di acqua di falda soggetta ad un flusso la componente di movimento determinata dalla diffusione generalmente trascurabile.

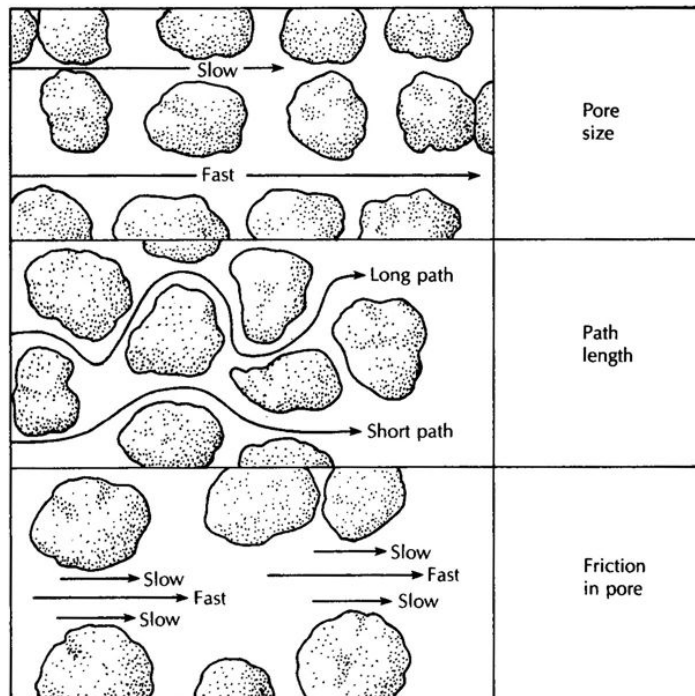
Trasporto per advezione

E' quella componente di trasporto che avviene in virtù del movimento dell'acqua di falda che, con il suo fluire fra i pori del terreno, porta con se il soluto disciolto.



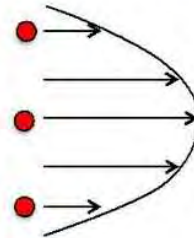
# Il trasporto di calore con MT3DMS

## Dispersione



## Dispersion longitudinale

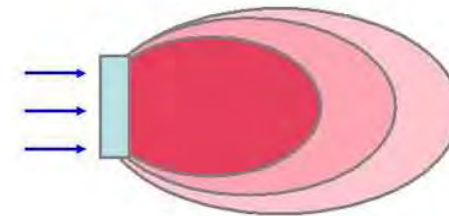
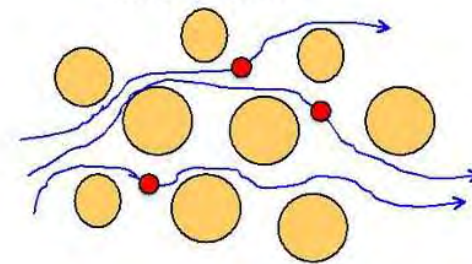
1. Variations in flow velocity



3. Causes the plume to spread

## Dispersion trasversale

2. Different solute flow paths



Risultato finale

# Il trasporto di calore con MT3DMS

L'equazione che descrive il **trasporto di massa** è **concettualmente simile** all'equazione che descrive il **trasporto di calore**.

Con opportuni accorgimenti è possibile **usare MT3DMS** (concepito per la simulazione del trasporto di massa), allo scopo di **simulare il trasporto di calore**.

**Il calore**, in questo caso, viene trattato dal software come se fosse un **«inquinante»**.

Va bene solo se nel modello le differenze di temperatura sono abbastanza contenute (la densità e viscosità dell'acqua nel modello è costante).

Per capire:

**L'acqua di falda a 15 °C** è analogo di acqua di falda nella quale è disciolto in maniera omogenea **l'inquinante «Temp» a concentrazione 15**;

Un pozzo che immette **14 L/s** di acqua con temperatura di **18 °C** è analogo di un pozzo che scarica in falda acqua ad una portata di **14 L/s** con disciolto **inquinante «Temp» a concentrazione 18**.

# Problema reale – Simulazione del trasporto di calore

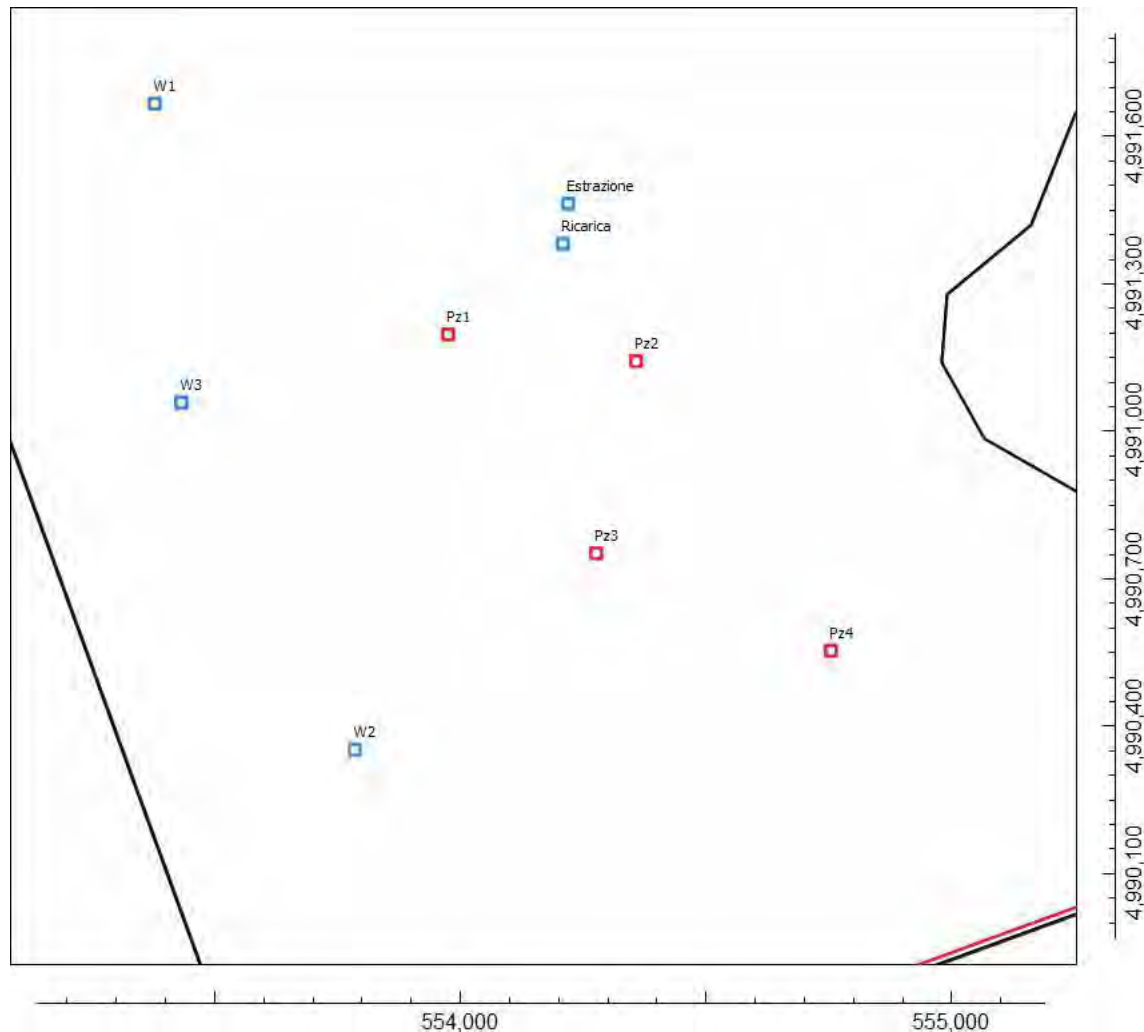
| Stagione | Giorni funzionamento   | Q media [m³/s] | T immissione [°C] |
|----------|------------------------|----------------|-------------------|
| Estate   | 181.12 gg = 15649111 s | 0.014          | 20                |
| Inverno  | 184.12 gg = 15908489 s | 0.007          | 10                |

| Starting time | Ending time | Temp concentration or mass-loading |
|---------------|-------------|------------------------------------|
| 0             | 1           | T_Fondo                            |
| 1             | 15649112    | T_Inverno                          |
| 15649112      | 31557601    | T_Estate                           |
| 31557601      | 47206712    | T_Inverno                          |
| 47206712      | 63115201    | T_Estate                           |
| 63115201      | 78764312    | T_Inverno                          |
| 78764312      | 94672801    | T_Estate                           |
| 94672801      | 110321912   | T_Inverno                          |
| 110321912     | 126230401   | T_Estate                           |
| 126230401     | 141879512   | T_Inverno                          |
| 141879512     | 157788001   | T_Estate                           |
| 157788001     | 173437112   | T_Inverno                          |
| 173437112     | 189345601   | T_Estate                           |
| 189345601     | 204994712   | T_Inverno                          |
| 204994712     | 220903201   | T_Estate                           |
| 220903201     | 236552312   | T_Inverno                          |

| Formula       |             |              |
|---------------|-------------|--------------|
| Starting time | Ending time | Pumping rate |
| 0             | 1           | Q_Stop       |
| 1             | 15649112    | Q_Inverno    |
| 15649112      | 31557601    | Q_Estate     |
| 31557601      | 47206712    | Q_Inverno    |
| 47206712      | 63115201    | Q_Estate     |
| 63115201      | 78764312    | Q_Inverno    |
| 78764312      | 94672801    | Q_Estate     |
| 94672801      | 110321912   | Q_Inverno    |
| 110321912     | 126230401   | Q_Estate     |
| 126230401     | 141879512   | Q_Inverno    |
| 141879512     | 157788001   | Q_Estate     |
| 157788001     | 173437112   | Q_Inverno    |
| 173437112     | 189345601   | Q_Estate     |

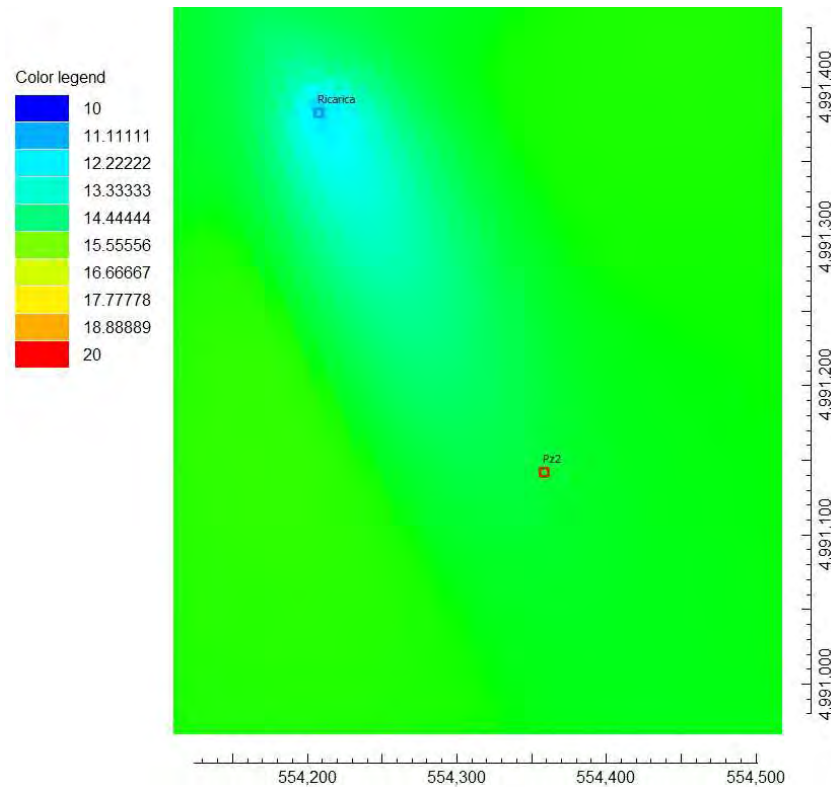
La simulazione si estende di solito per 10 anni

## Problema reale – Simulazione del trasporto di calore

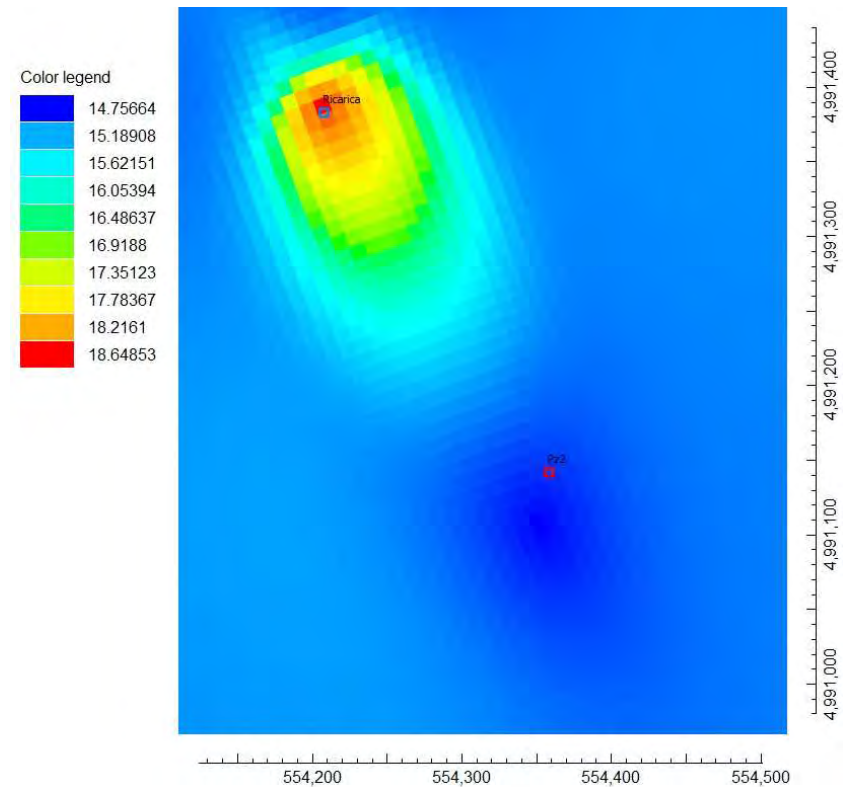


Distanza da ricarica  
Ricarica -> 0 m  
Estrazione -> 80 m  
Pz1 -> 297 m  
Pz2 -> 284 m  
Pz3 -> 638 m  
Pz4 -> 1000 m

## Problema reale – Simulazione del trasporto di calore

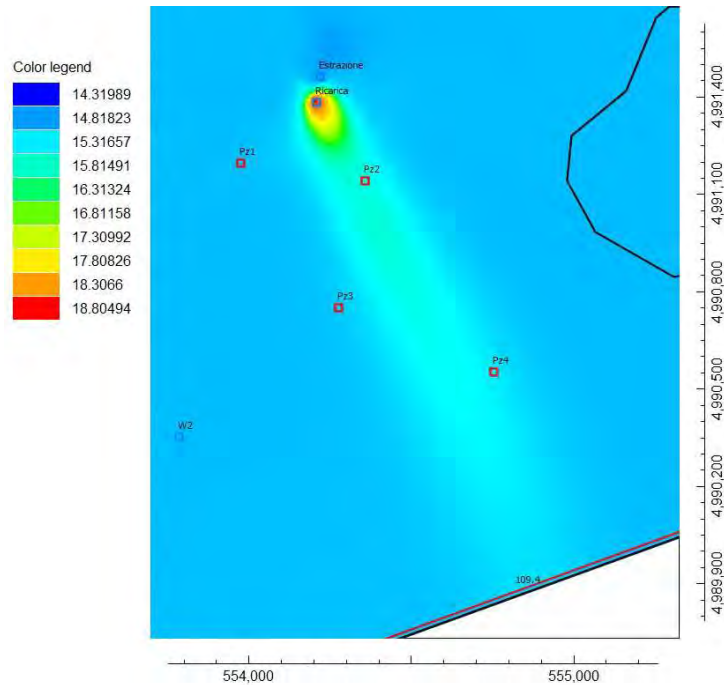


Inverno 1

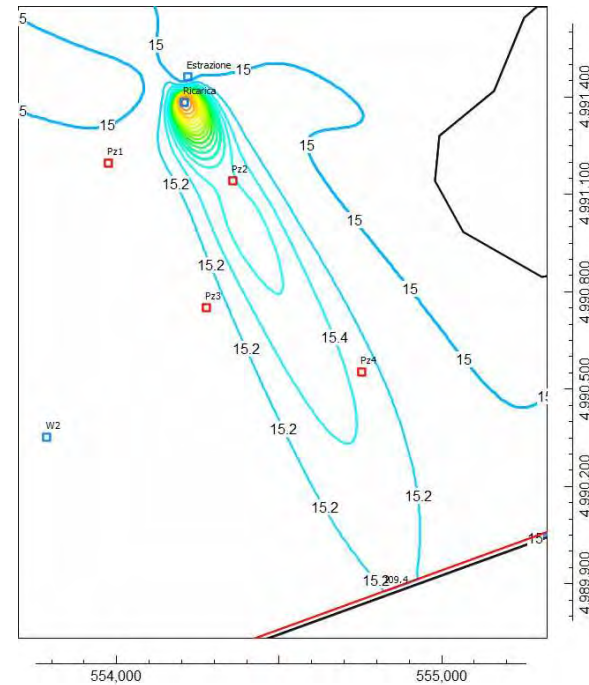


Estate 1

# Problema reale – Simulazione del trasporto di calore

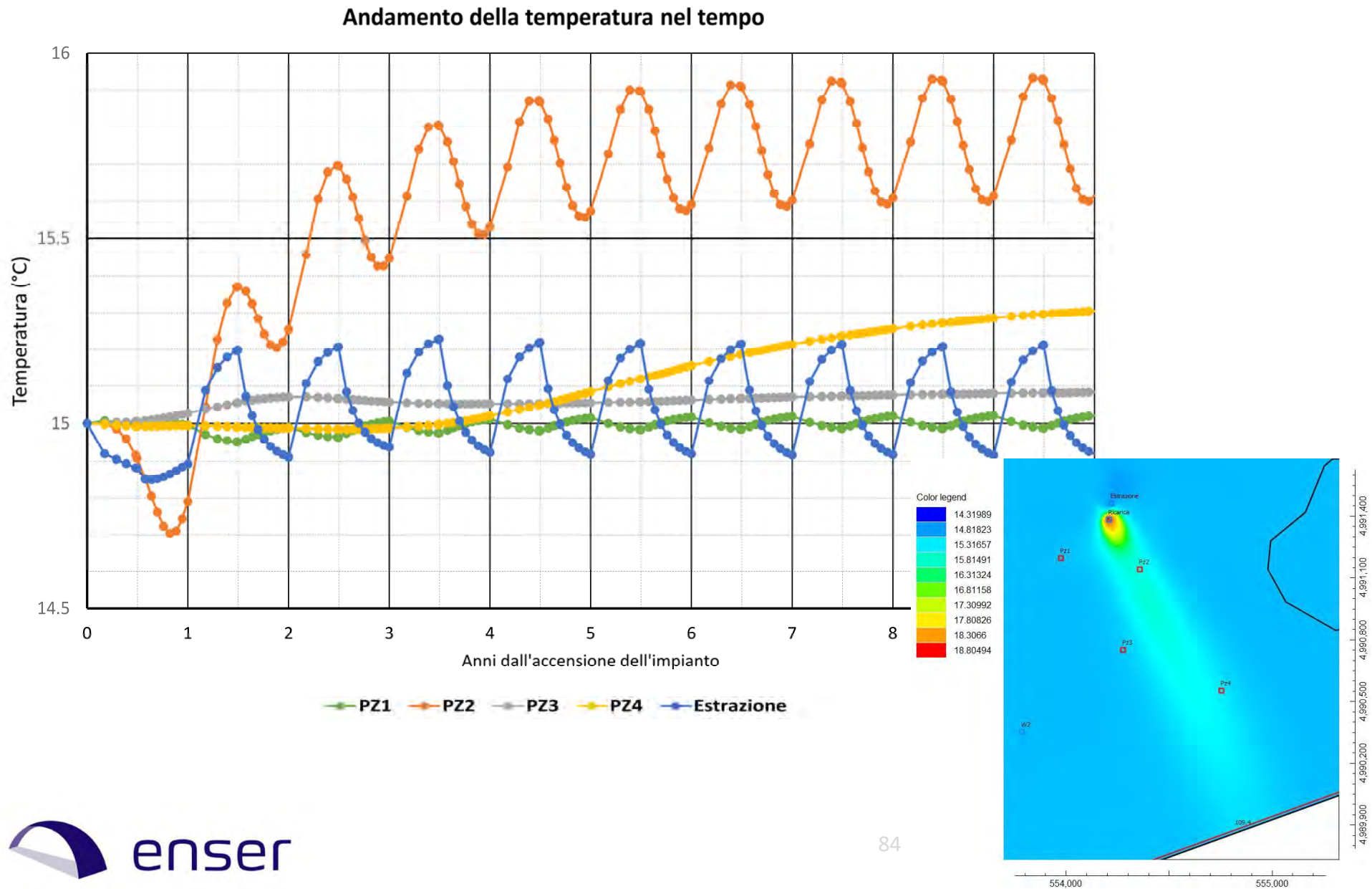


Fine estate 10

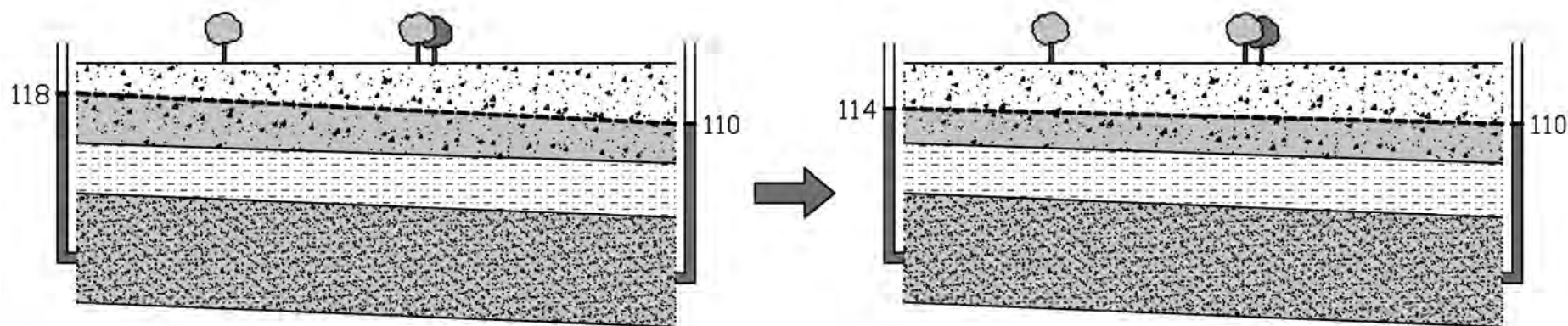


Fine estate 10

# Problema reale – Simulazione del trasporto di calore

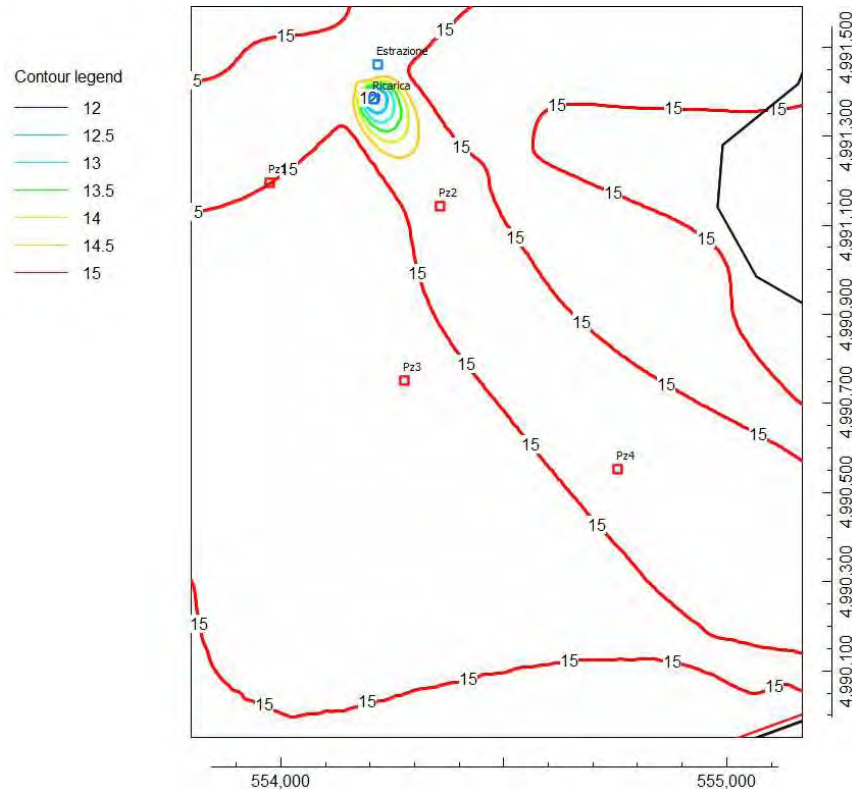


## Problema reale – gradiente idraulico dimezzato

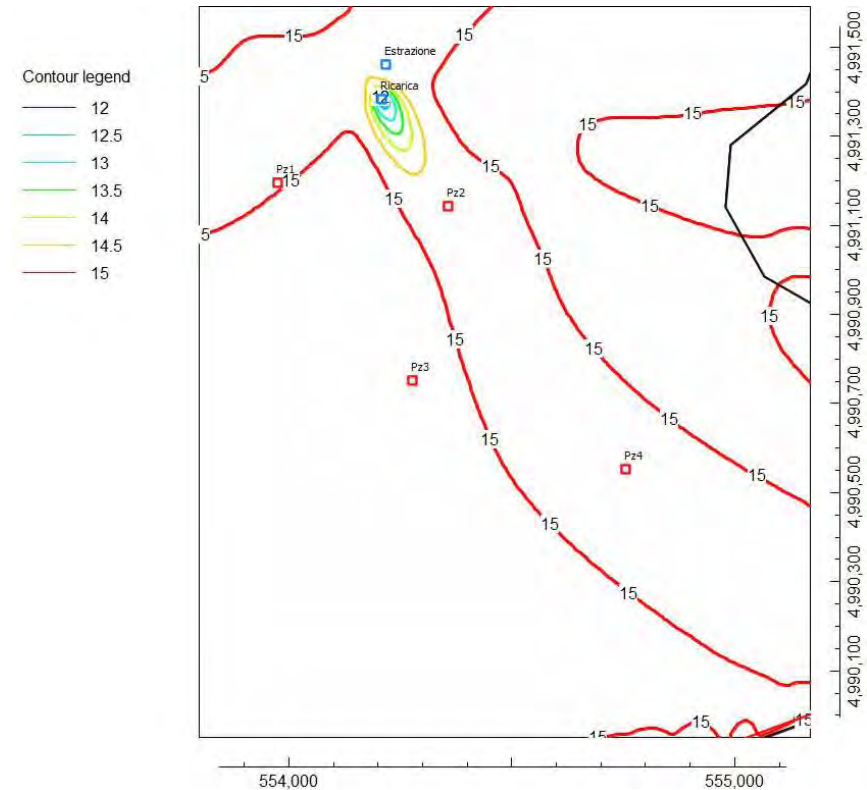


Modello uguale al precedente ma con gradiente idraulico dimezzato

# Problema reale – gradiente idraulico dimezzato – Fine inverno 1

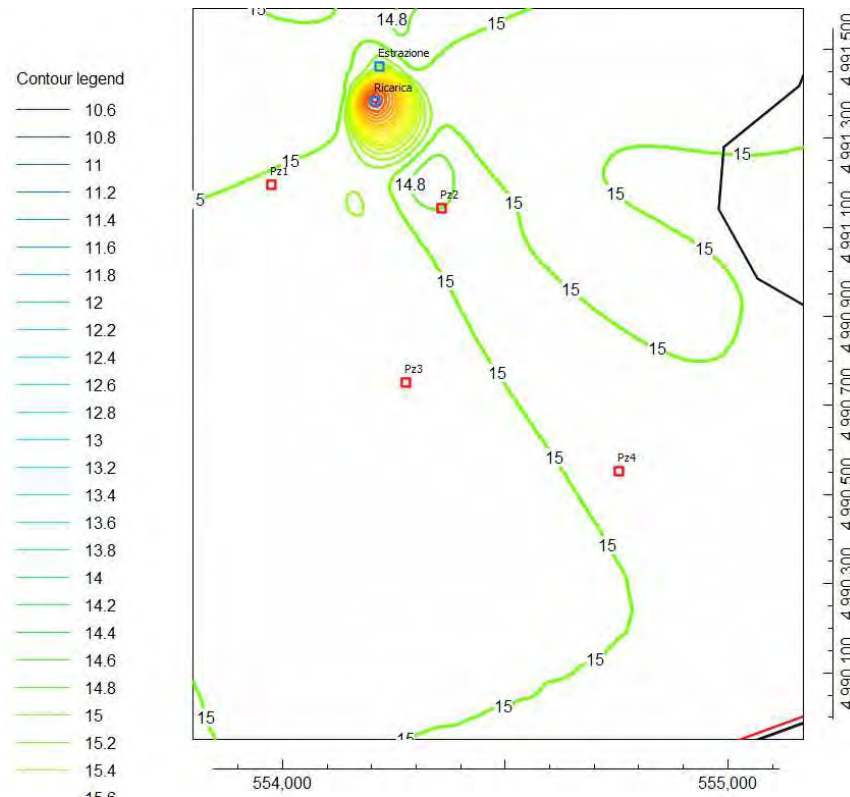


Gradiente idraulico dimezzato

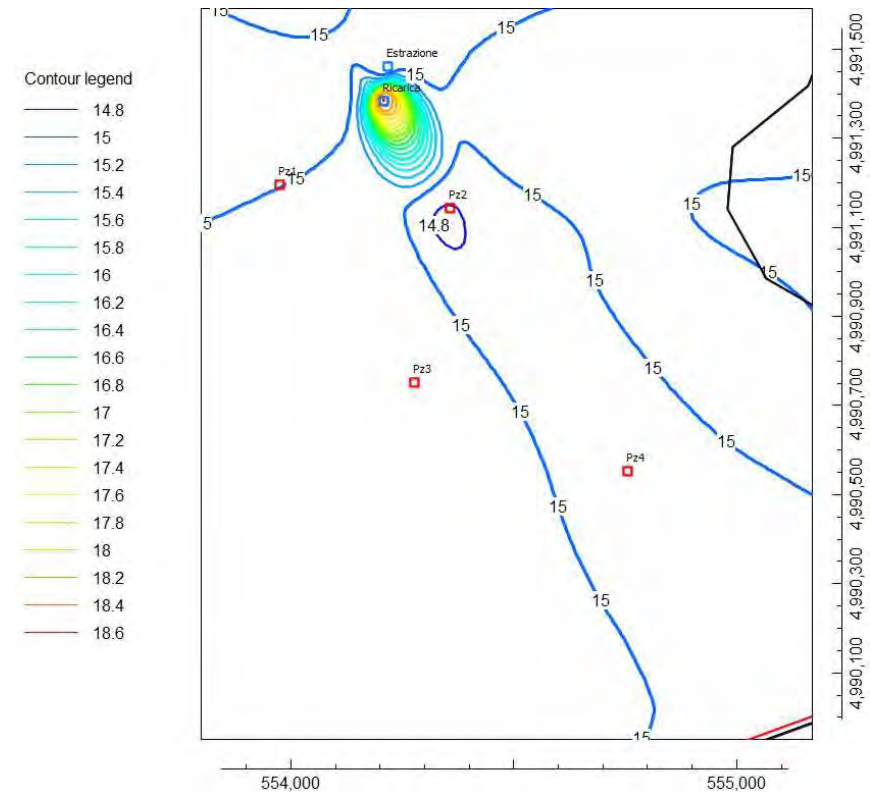


Gradiente idraulico inalterato

# Problema reale – gradiente idraulico dimezzato – Fine estate 1

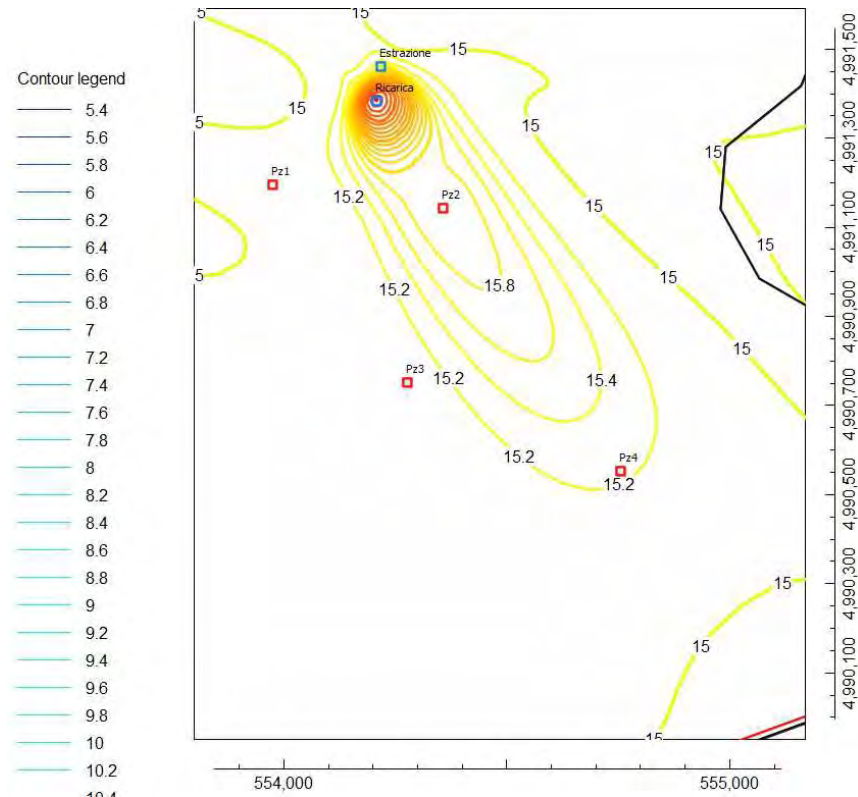


Gradiente idraulico dimezzato

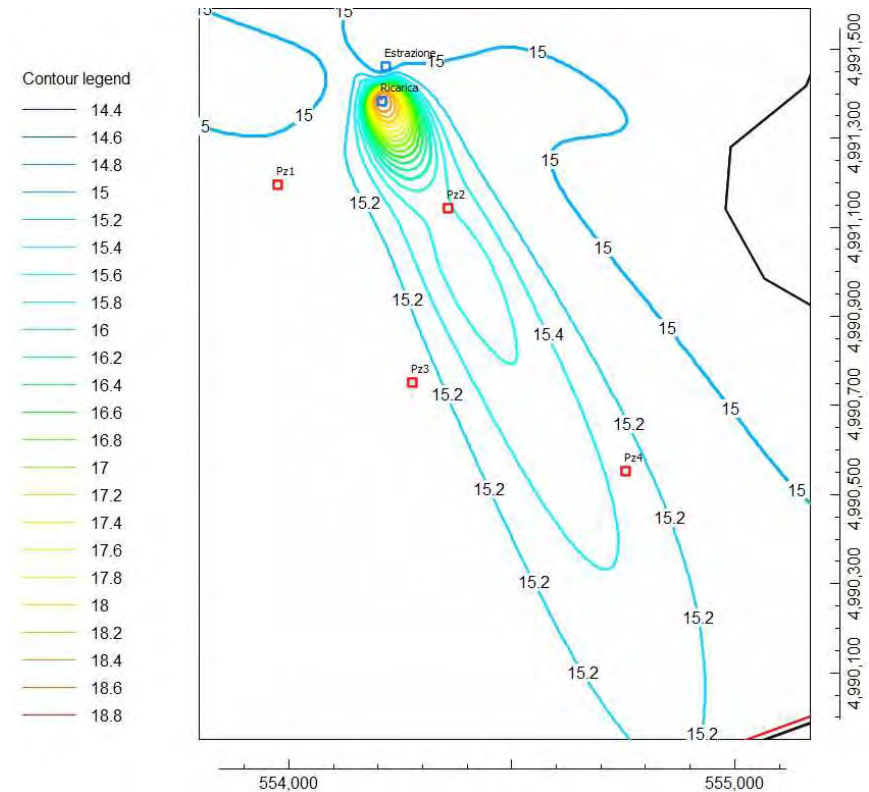


Gradiente idraulico inalterato

## Problema reale – gradiente idraulico dimezzato – Fine estate 10

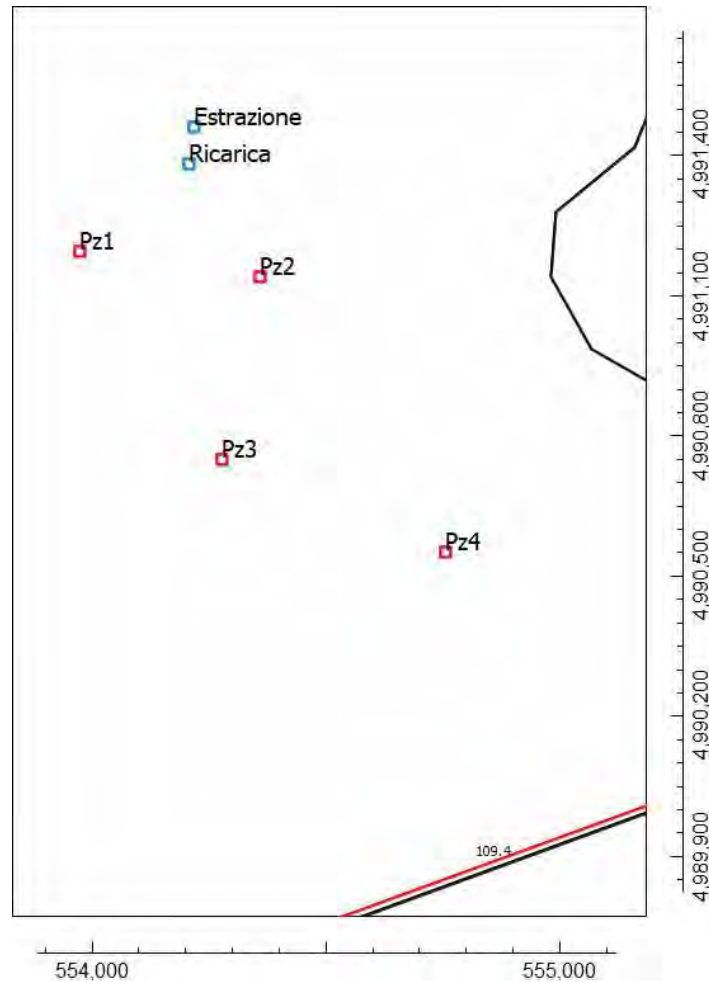


Gradiente idraulico dimezzato

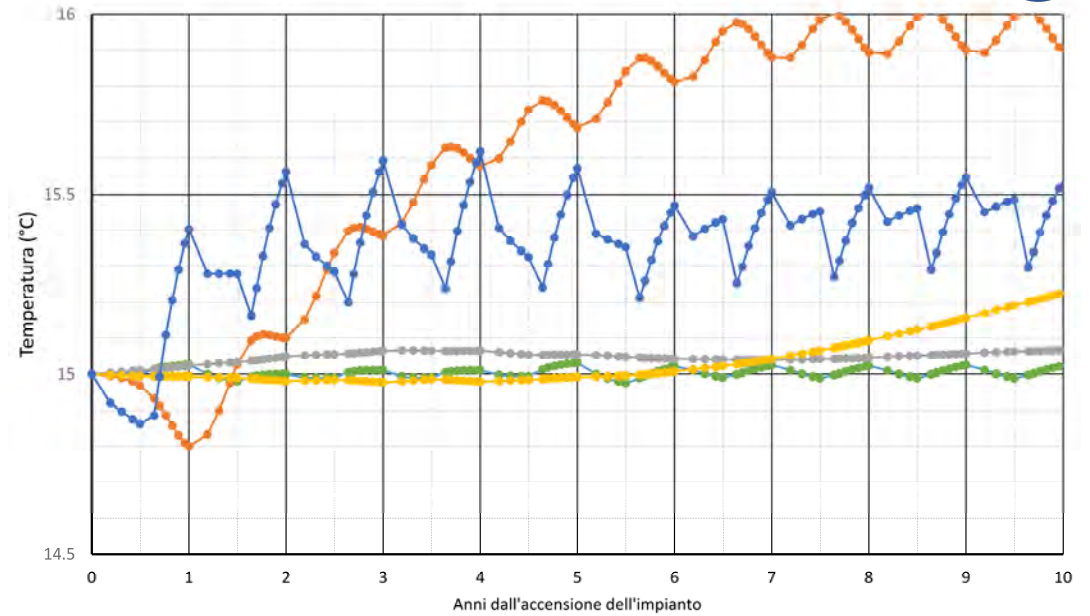


Gradiente idraulico inalterato

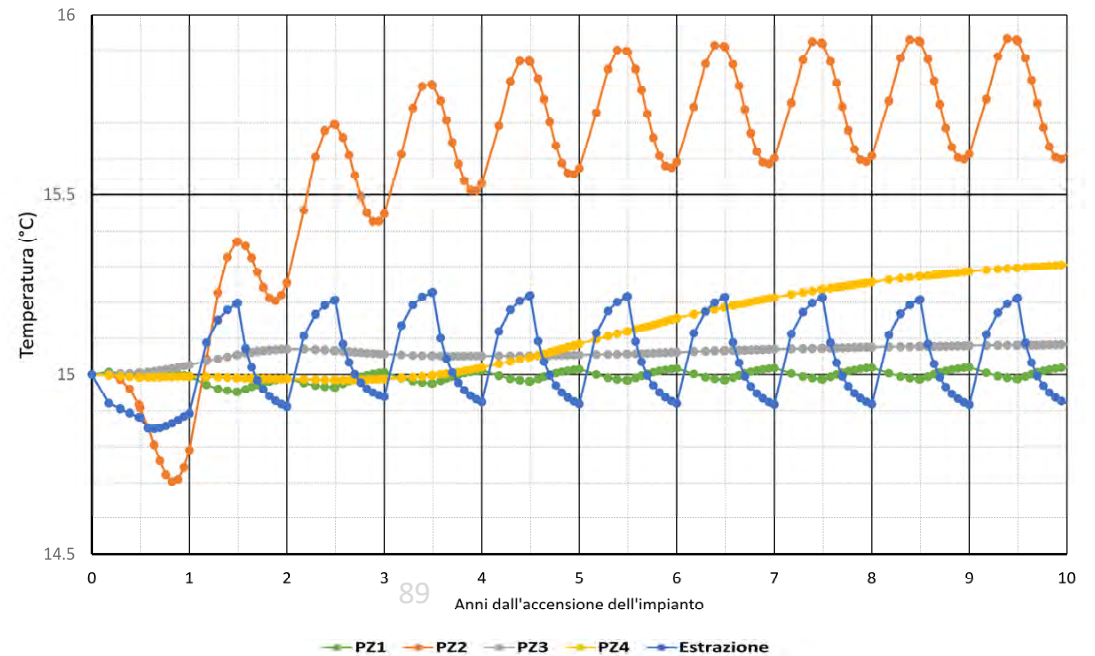
# Problema reale – gradiente idraulico dimezzato – Comparazione $\Delta t$



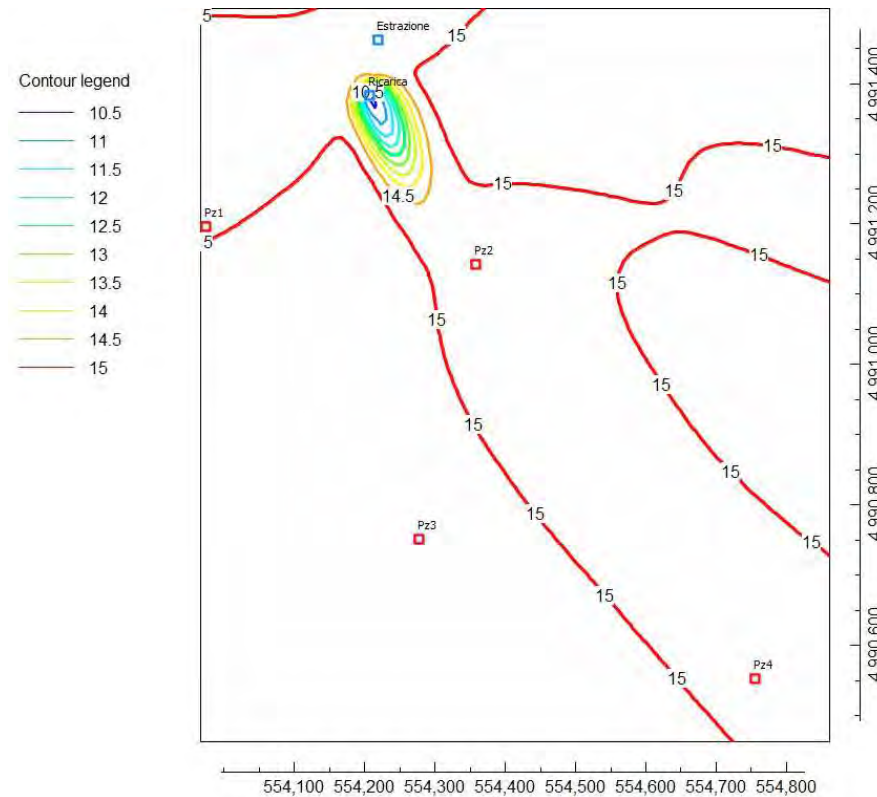
Andamento della temperatura nel tempo, i dimezzato



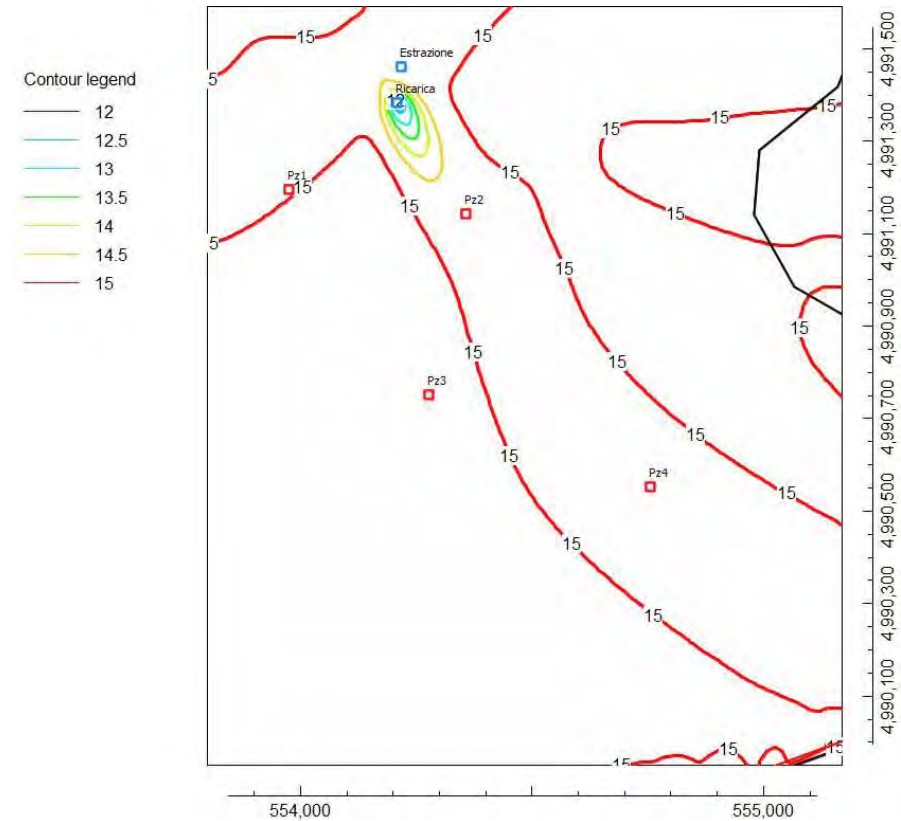
Andamento della temperatura nel tempo



# Problema reale – modifica della longitudinal dispersivity fine inverno 1



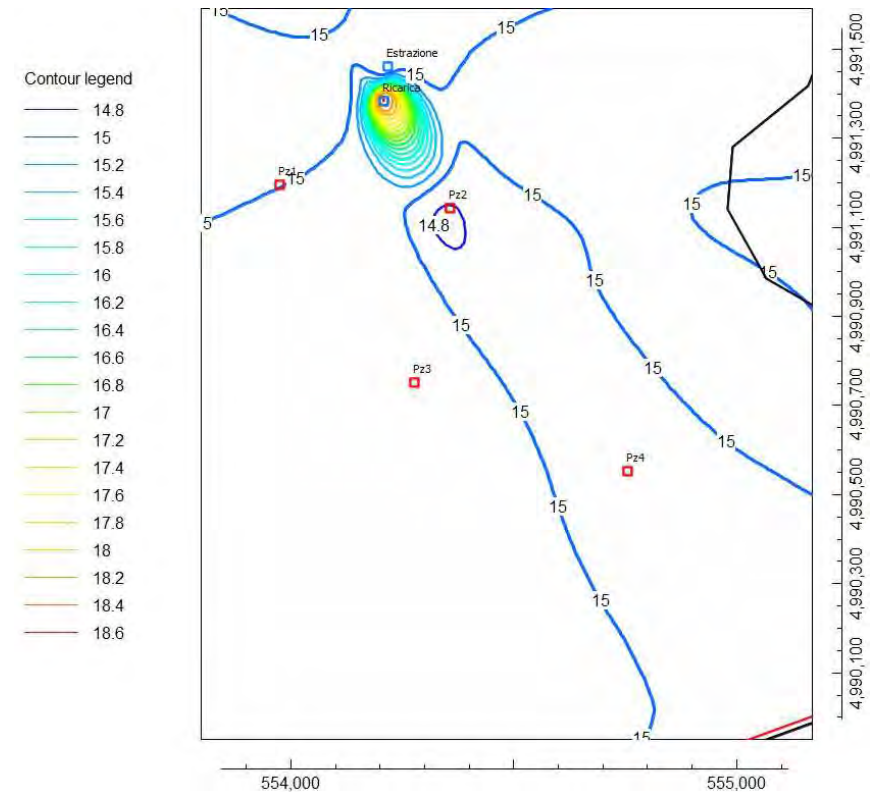
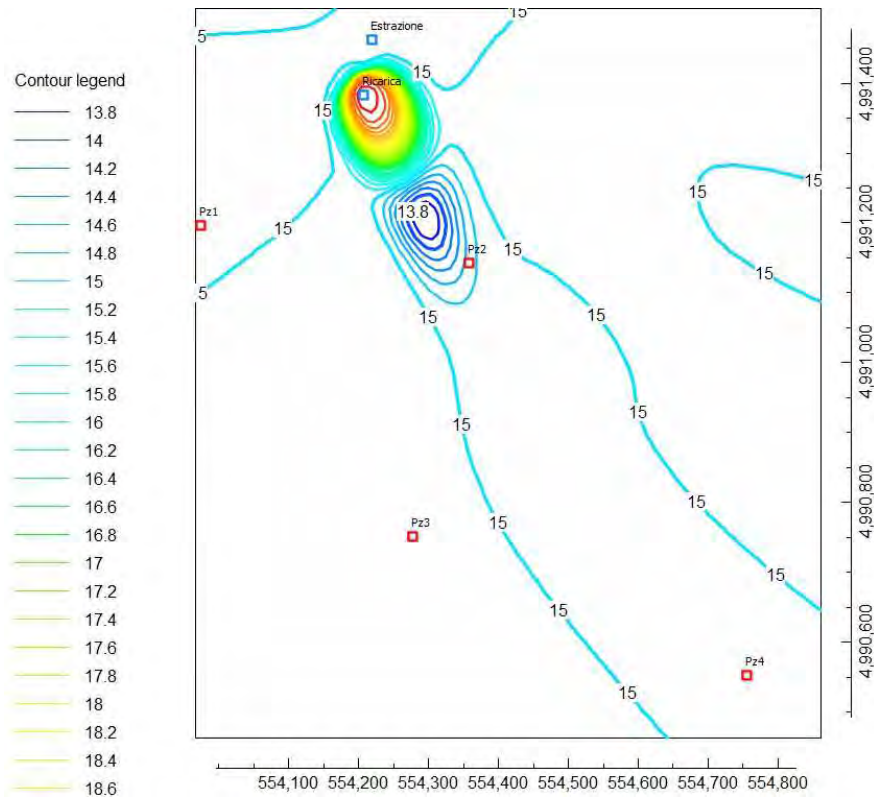
Longitudinal dispersivity = 8



Longitudinal dispersivity = 64

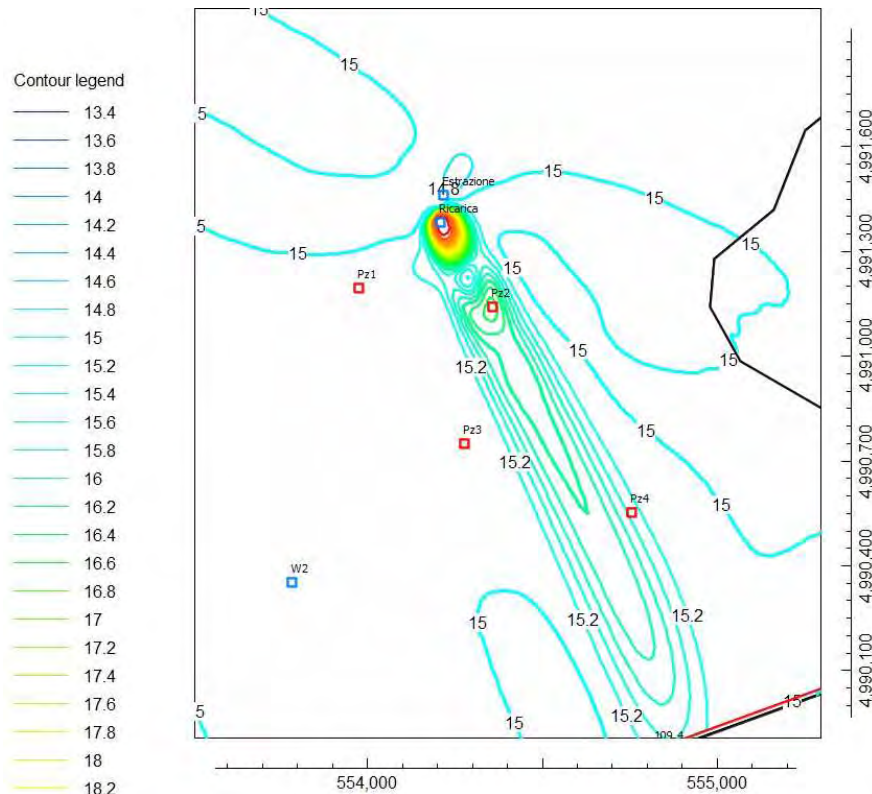
# Problema reale – modifica della longitudinal dispersivity

## Fine estate 1

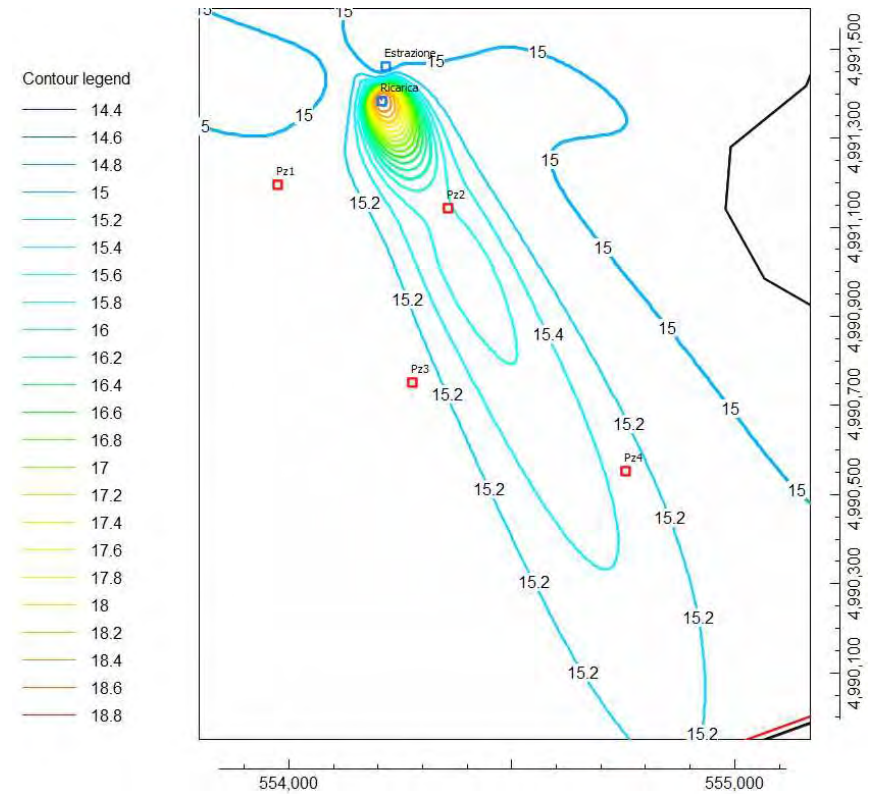


# Problema reale – modifica della longitudinal dispersivity

## Fine estate 10

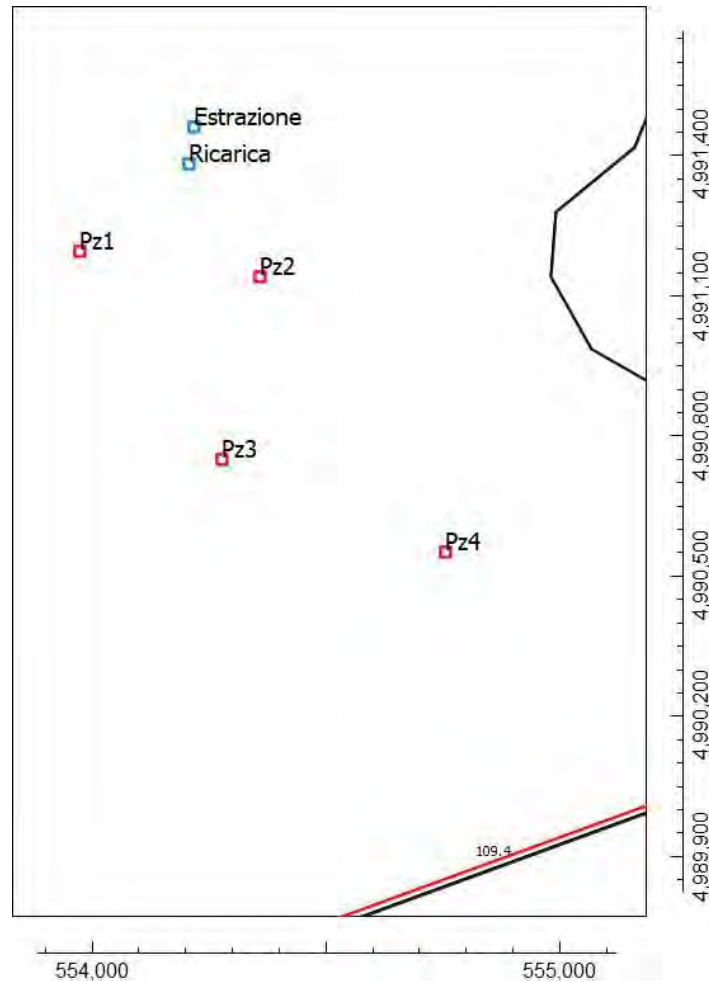


Longitudinal dispersivity = 8

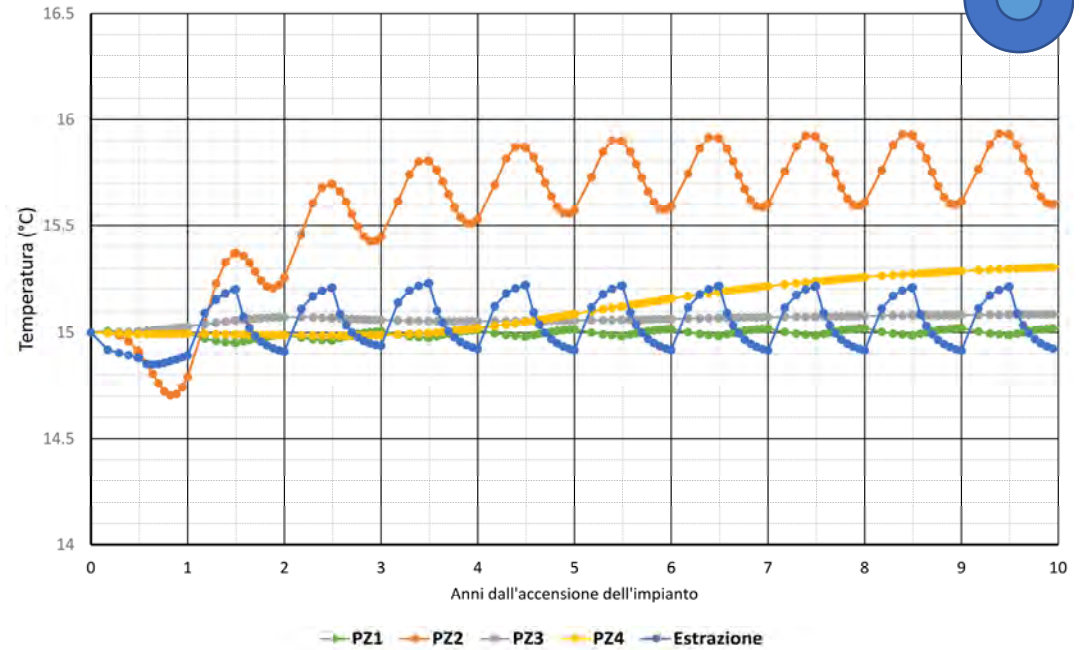


Longitudinal dispersivity = 64

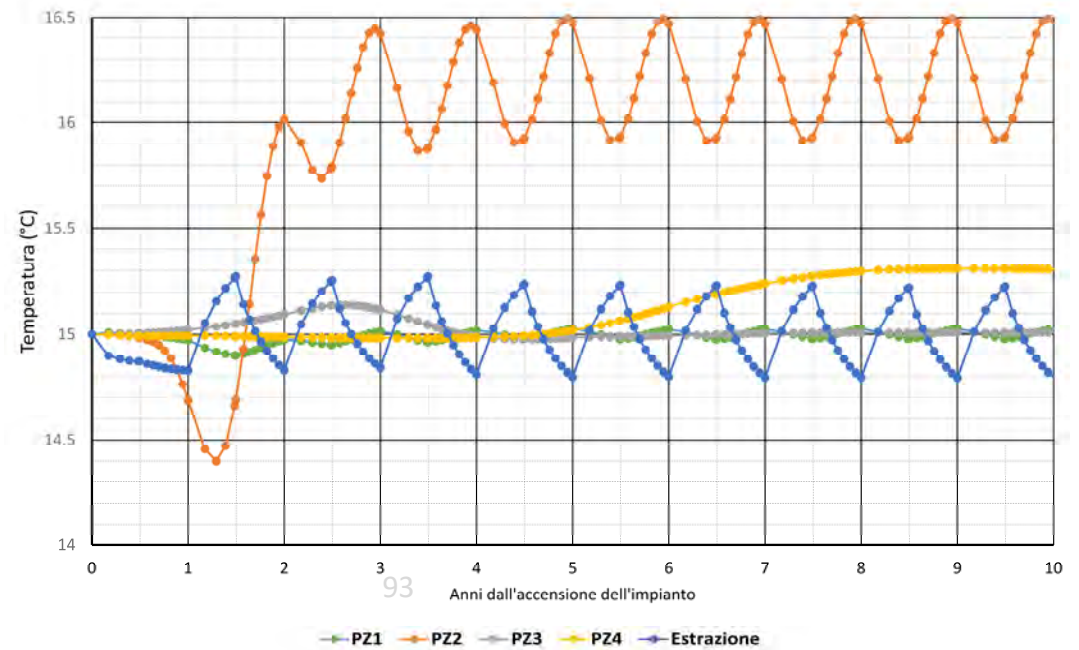
# Problema reale – variazione della longitudinal dispersivity



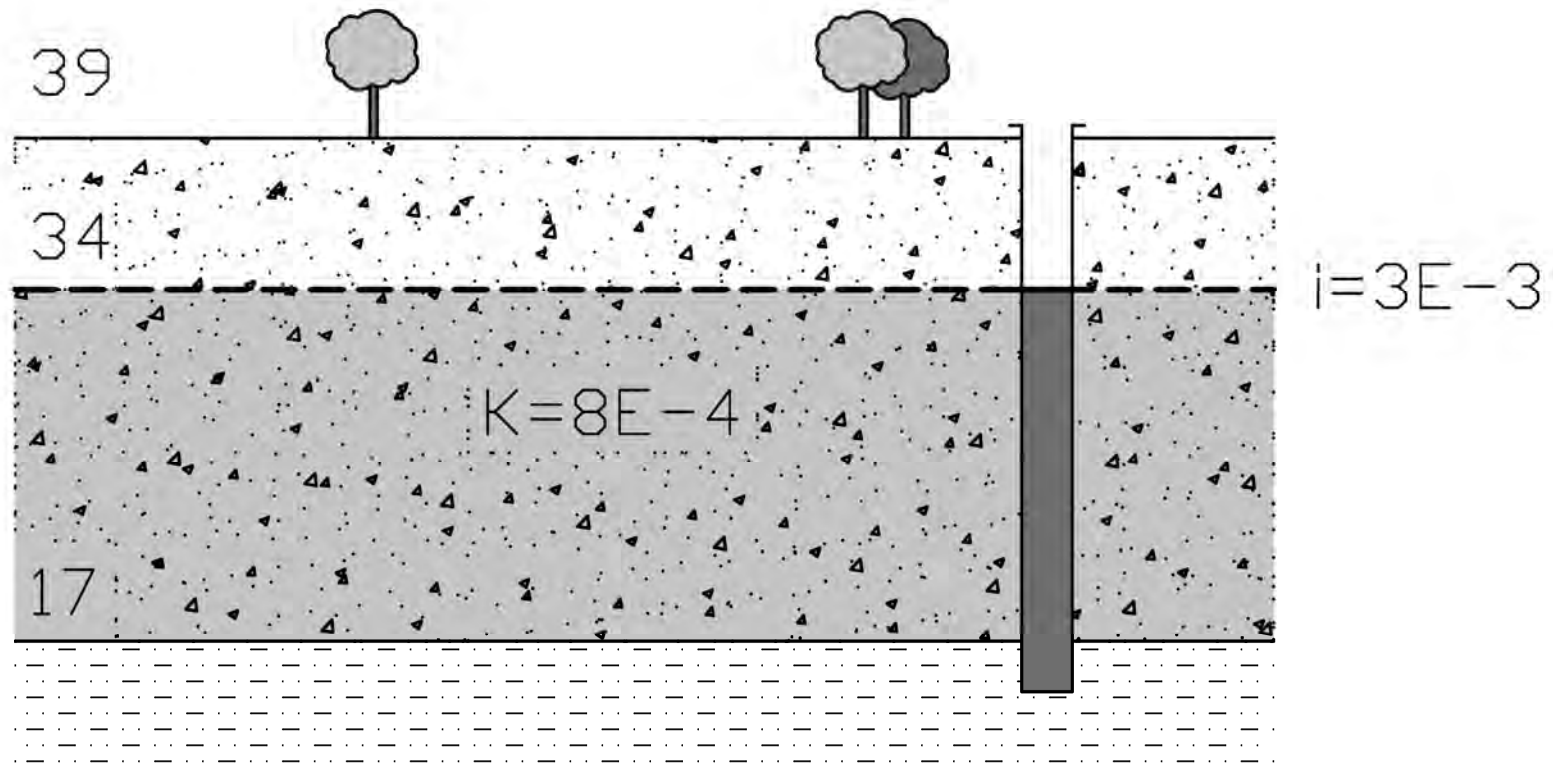
Andamento della temperatura nel tempo - Long. Disp = 64



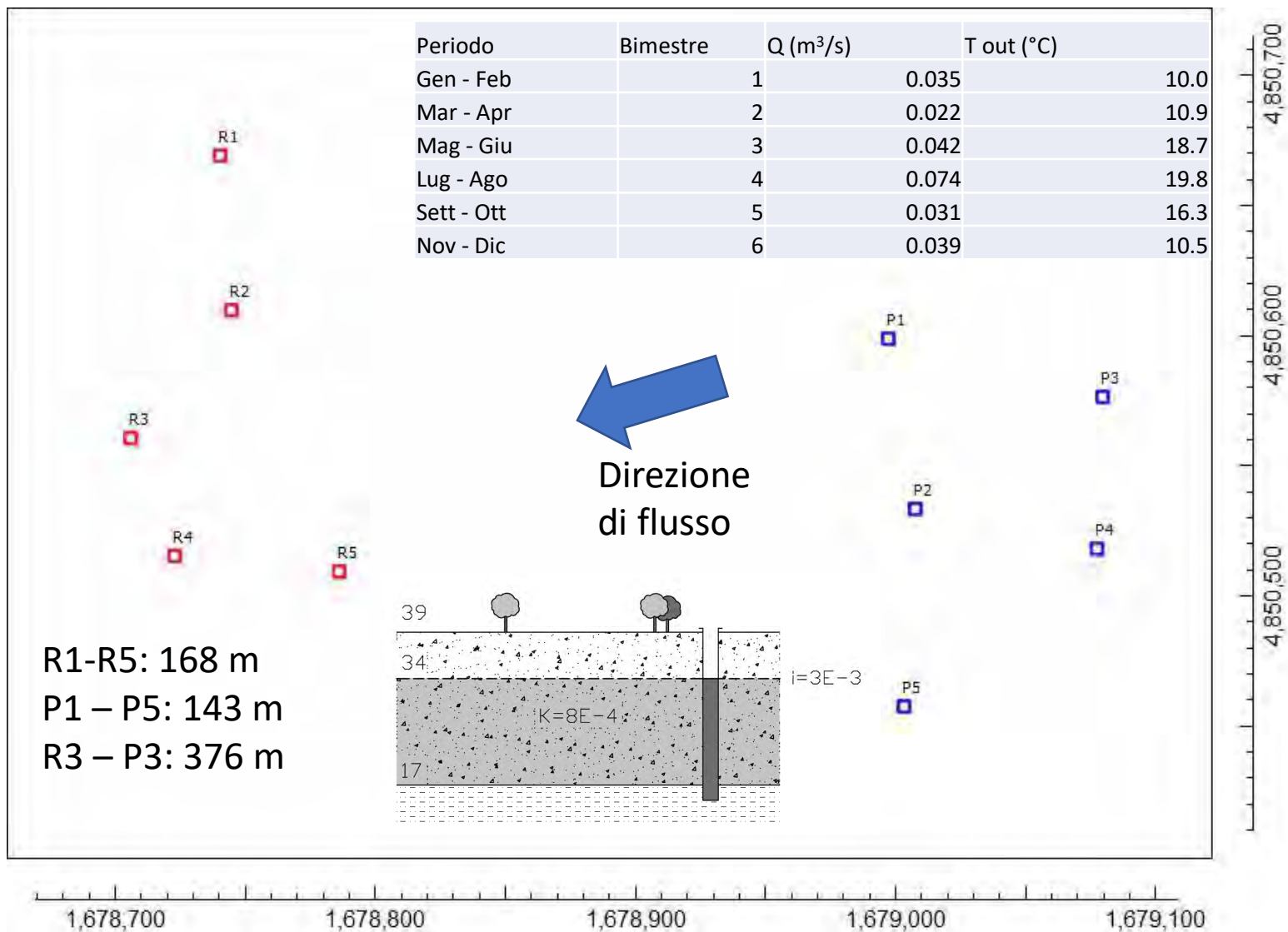
Andamento della temperatura nel tempo - Long. Disp = 8



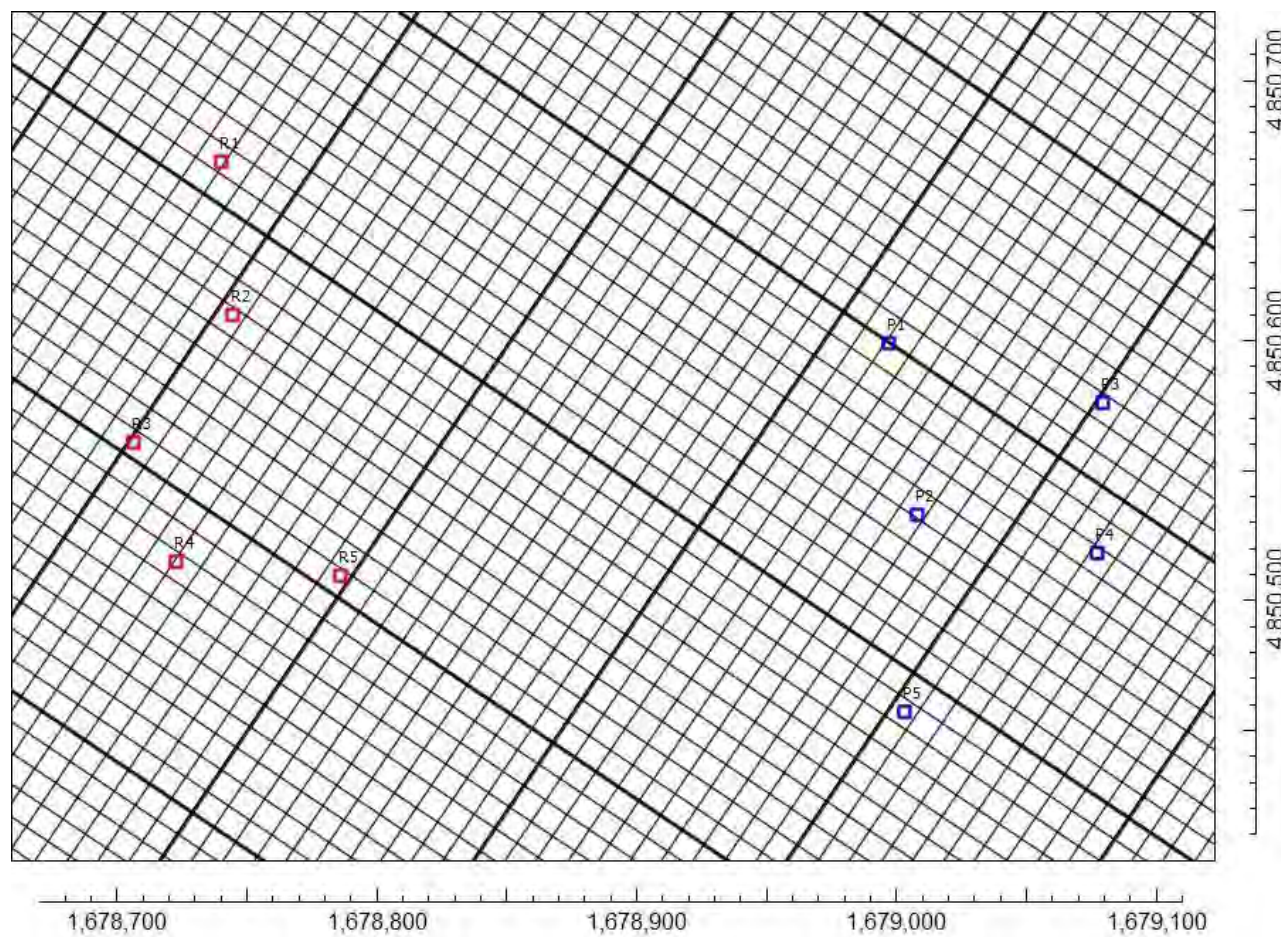
## Problema reale – Modello Toscana 5 + 5



## Problema reale – Modello Toscana 5 + 5



## Problema reale – Modello Toscana 5 + 5



| Codice | Col | Row |
|--------|-----|-----|
| P1     | 173 | 81  |
| P2     | 177 | 85  |
| P3     | 181 | 78  |
| P4     | 184 | 83  |
| P5     | 181 | 92  |
| R1     | 147 | 89  |
| R2     | 151 | 94  |
| R3     | 151 | 100 |
| R4     | 155 | 103 |
| R5     | 160 | 100 |
| Obs1   | 166 | 89  |
| Obs2   | 155 | 99  |
| Obs3   | 142 | 111 |
| Obs4   | 129 | 124 |
| Obs5   | 107 | 152 |

# Visualizzazione dei dati con GWChart



**SCIENCE**  
Topics, centers,  
missions

**PRODUCTS**  
Maps, data,  
publications

**NEWS**  
Releases,  
I'm a reporter

**CONNECT**  
Contact, chat,  
social media

**ABOUT**  
Organization,  
jobs, budget

Search 



## GW\_Chart: A Program for Creating Specialized Graphs Used in Groundwater Studies

Release Date: JUNE 26, 2020

### Overview of GW\_Chart

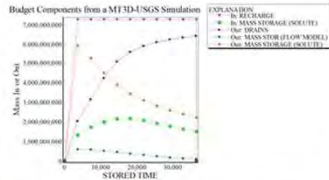
GW\_Chart is a program for creating specialized graphs used in groundwater studies. It incorporates the functionality of two previous programs, Budgeteer and Hydrograph Extractor and adds additional new features. There are seven major types of graphs created with GW\_Chart:

- Calibration Plots
- Water Budget Plots
- Hydrographs
- Lake Plots
- Piper Diagrams
- Cell Water Budgets
- Farm Budgets

It reads data from the following programs to create these plots:

- ZONEBUDGET
- MODFLOW
- MOC3D
- MODFLOW2000-GWT
- SUTRA
- MT3D
- HST3D
- UCODE-2005
- OPR-PPR

GW\_Chart can also convert cell-by-cell budget files or zeta file generated by MODFLOW to text files.



*Graph of budget components from a MT3D-USGS simulation versus time generated by GW\_Chart based on results from a hypothetical model.*

### Contacts

**USGS MODFLOW Team**  
Email: [modflow@usgs.gov](mailto:modflow@usgs.gov)

**Richard B Winston, Ph.D.**  
**Hydrologist**  
USGS Water Resources Mission Area  
Email: [rbwinst@usgs.gov](mailto:rbwinst@usgs.gov)  
Phone: 703-648-5988

### Explore More Science

[MODFLOW](#)  
[SUTRA](#)  
[HST3D](#)  
[UCODE](#)  
[MT3D](#)

[View All](#) 

<https://www.usgs.gov/software/gwchart-a-program-creating-specialized-graphs-used-groundwater-studies>

# Visualizzazione dei dati con GWChart



Nel caso in cui si esaminino molte serie conviene esportare in Excel

Andamento dei carichi idraulici nel tempo nei 15 punti di controllo selezionati

# Visualizzazione dei dati con GWChart

File

Home

Sviluppo

Inserisci

Disegno

Layout di pagina

Formule

Dati

Revisione

Visualizza

Guida

Struttura tabella

Query

Nome tabella:

Carichi\_idraulici

Ridimensiona tabella

Proprietà

Riepiloga con tabella pivot

Rimuovi duplicati

Converti in intervallo

Strumenti

Inserisci filtro dei dati

Esporta

Aggiorna

Apri nel browser

Scollega

Dati tabella esterna

☒ Riga di intestazione

☐ Riga Totale

☒ Righe alternate evidenziate

☐ Prima colonna

☐ Ultima colonna

☐ Colonne alternate evidenziate

Opzioni stile tabella

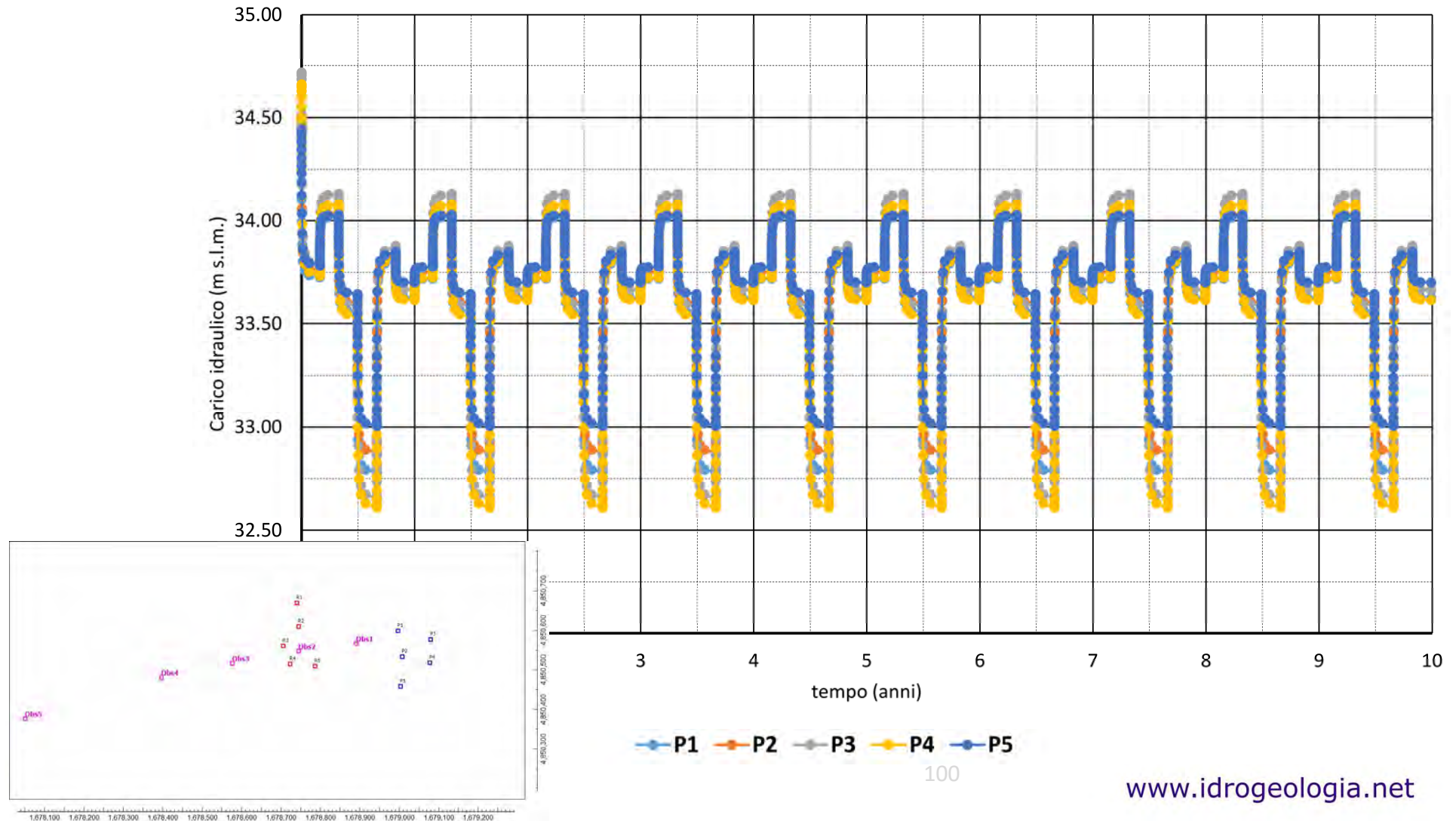
<

Andamento dei carichi idraulici nel tempo - Estrazione dei dati in Excel

# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Carichi idraulici nel tempo – pozzi di presa

| Periodo    | Bimestre | Q (m³/s) | T out (°C) |
|------------|----------|----------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035    | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022    | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042    | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074    | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031    | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039    | 10.5       |

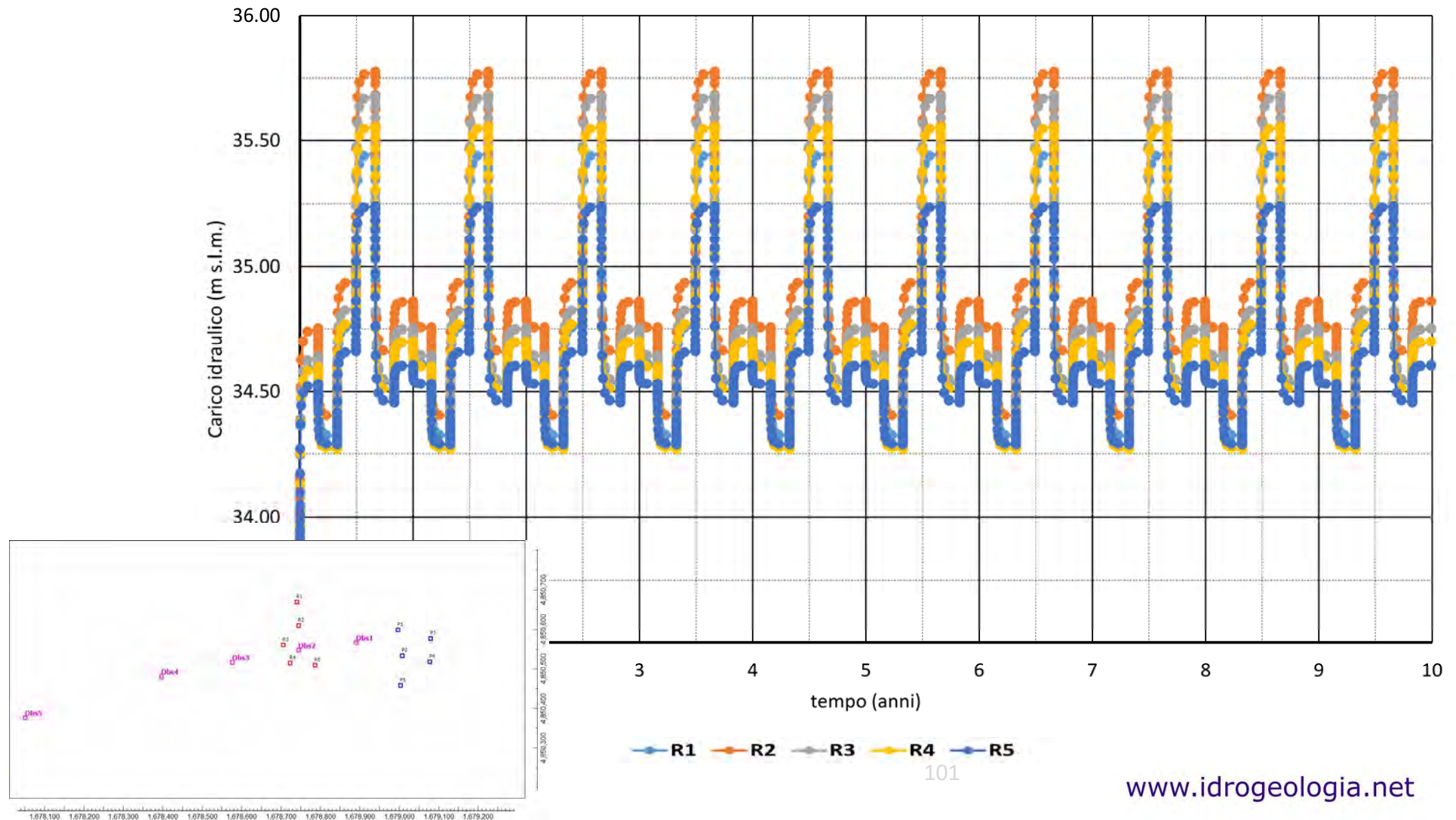
Carichi idraulici - pozzi di presa



# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Carichi idraulici nel tempo – pozzi di resa

| Periodo    | Bimestre | Q (m³/s) | T out (°C) |
|------------|----------|----------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035    | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022    | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042    | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074    | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031    | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039    | 10.5       |

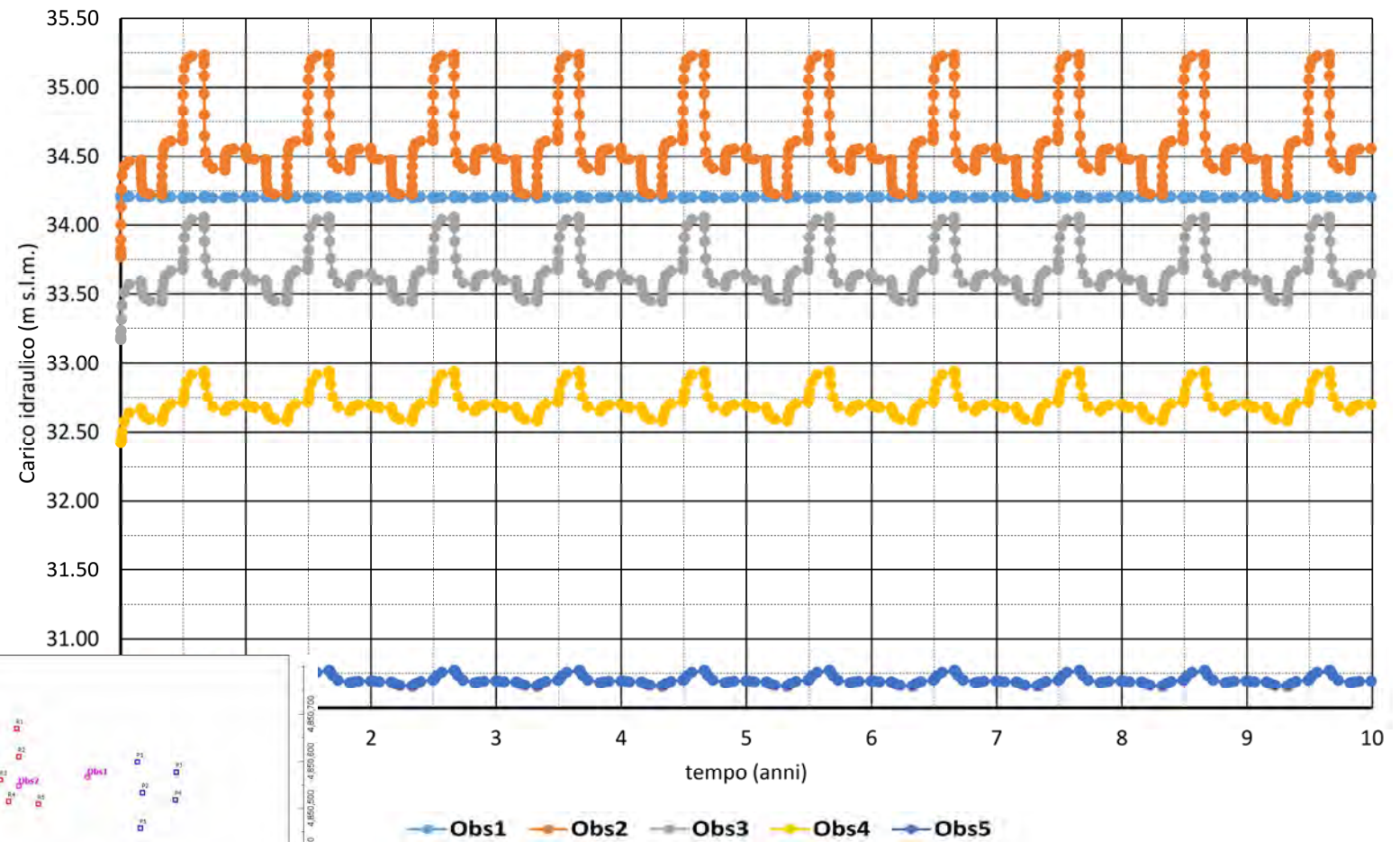
Carichi idraulici - pozzi di resa



# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Carichi idraulici nel tempo – Obs

| Periodo    | Bimestre | Q (m <sup>3</sup> /s) | T out (°C) |
|------------|----------|-----------------------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035                 | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022                 | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042                 | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074                 | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031                 | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039                 | 10.5       |

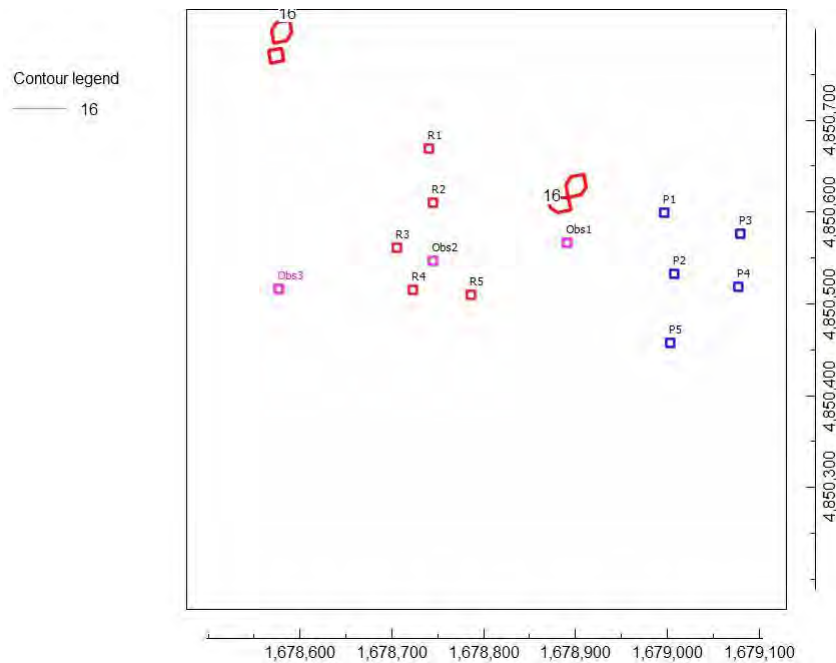
Carichi idraulici - Punti di osservazione



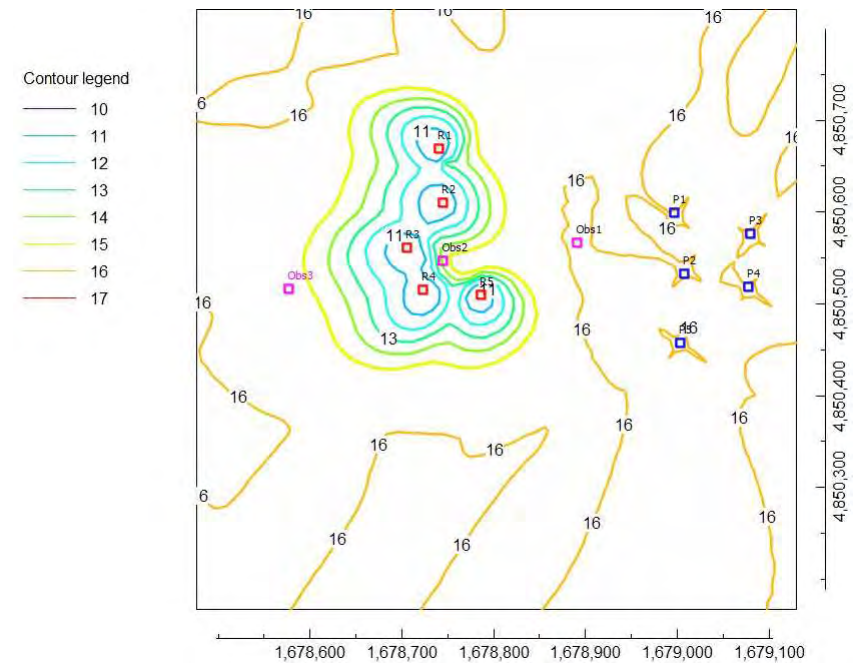
# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

| Periodo    | Bimestre | Q (m <sup>3</sup> /s) | T out (°C) |
|------------|----------|-----------------------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035                 | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022                 | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042                 | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074                 | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031                 | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039                 | 10.5       |

Istante 0 (impianto spento)



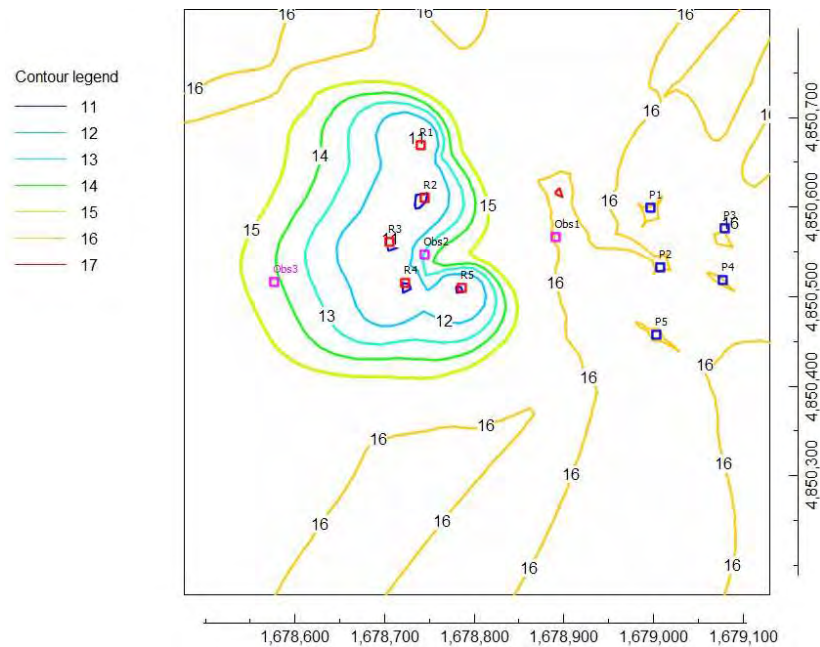
Bimestre 1 (gen-feb)



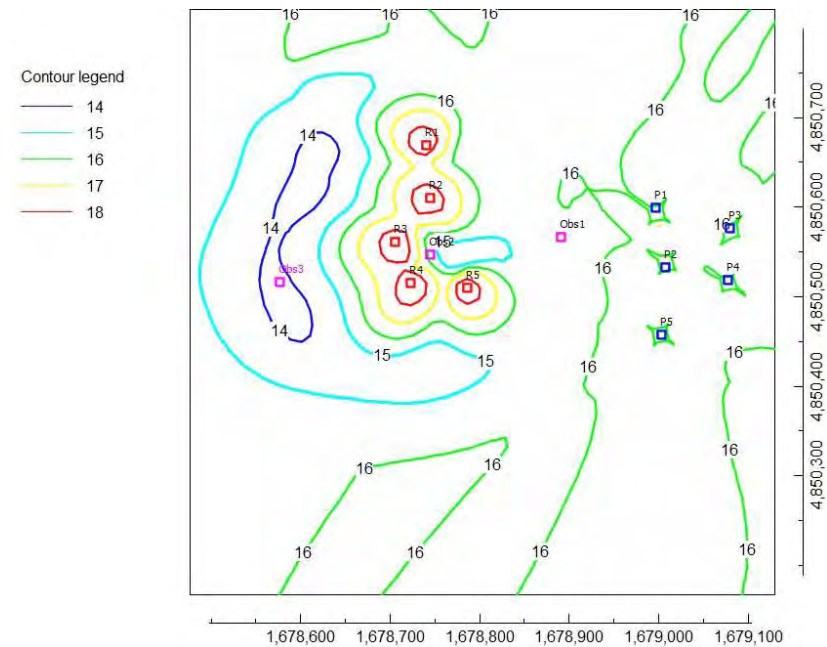
# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

| Periodo    | Bimestre | Q (m <sup>3</sup> /s) | T out (°C) |
|------------|----------|-----------------------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035                 | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022                 | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042                 | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074                 | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031                 | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039                 | 10.5       |

Bimestre 2 (mar-apr)



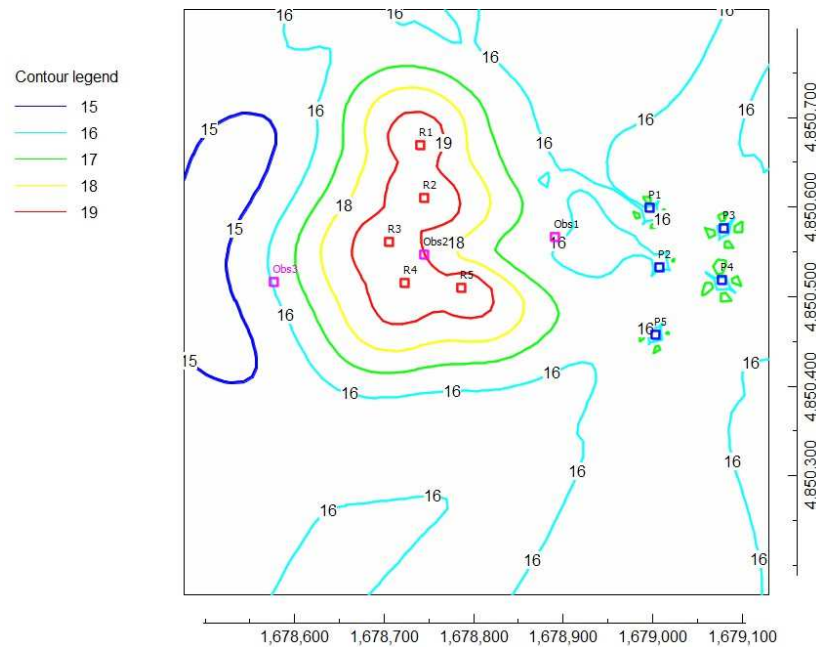
Bimestre 3 (mag-giu)



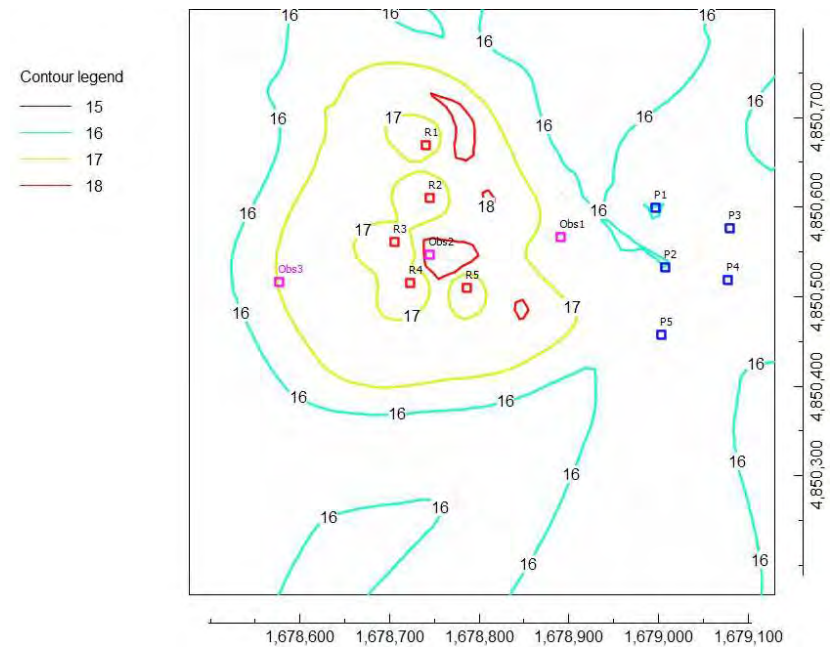
# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

| Periodo    | Bimestre | Q (m <sup>3</sup> /s) | T out (°C) |
|------------|----------|-----------------------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035                 | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022                 | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042                 | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074                 | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031                 | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039                 | 10.5       |

Bimestre 4 (lug-ago)



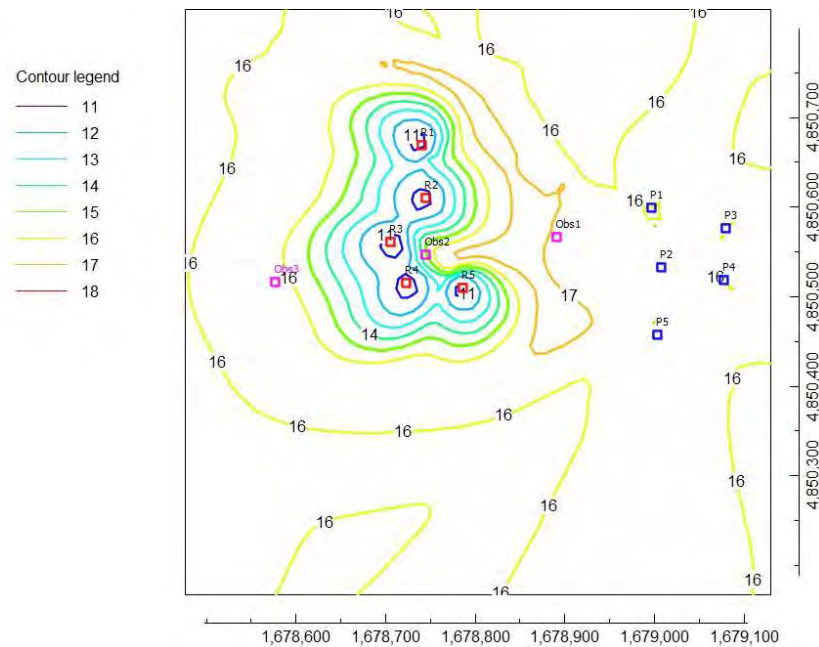
Bimestre 5 (set-ott)



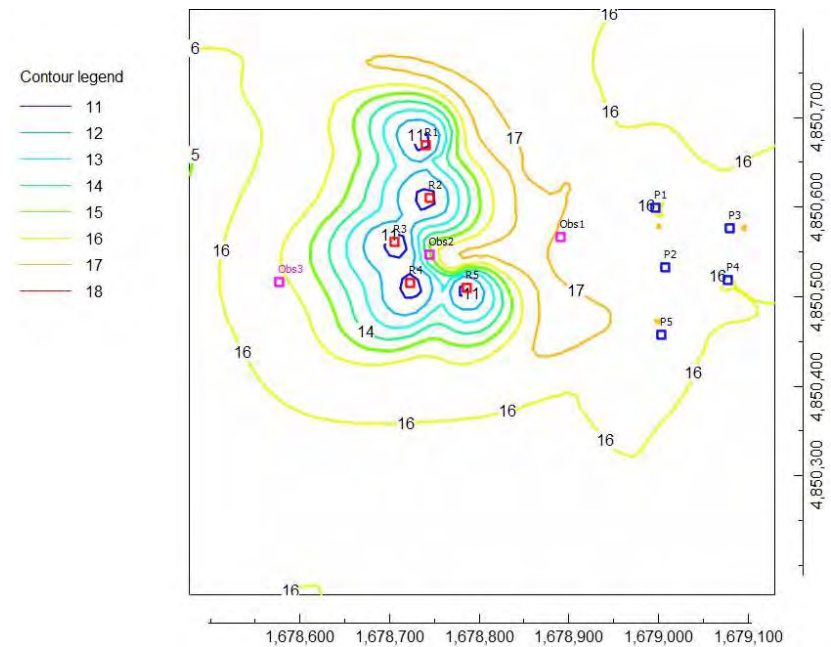
# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

| Periodo    | Bimestre | Q (m <sup>3</sup> /s) | T out (°C) |
|------------|----------|-----------------------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035                 | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022                 | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042                 | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074                 | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031                 | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039                 | 10.5       |

Bimestre 6 (nov-dic)



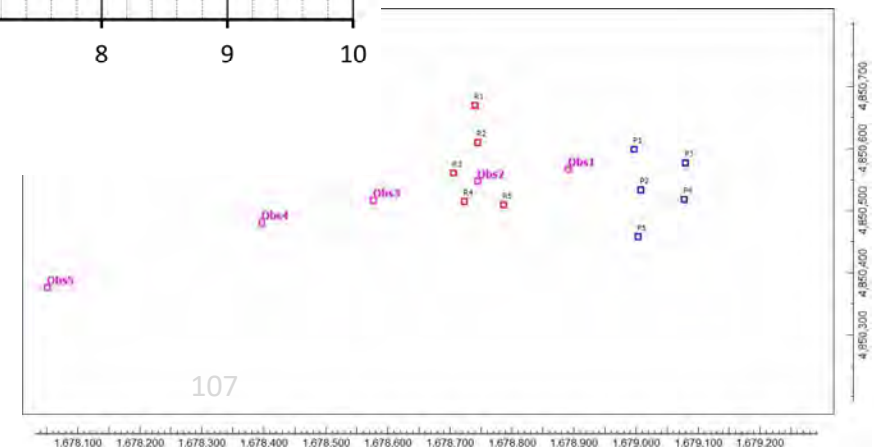
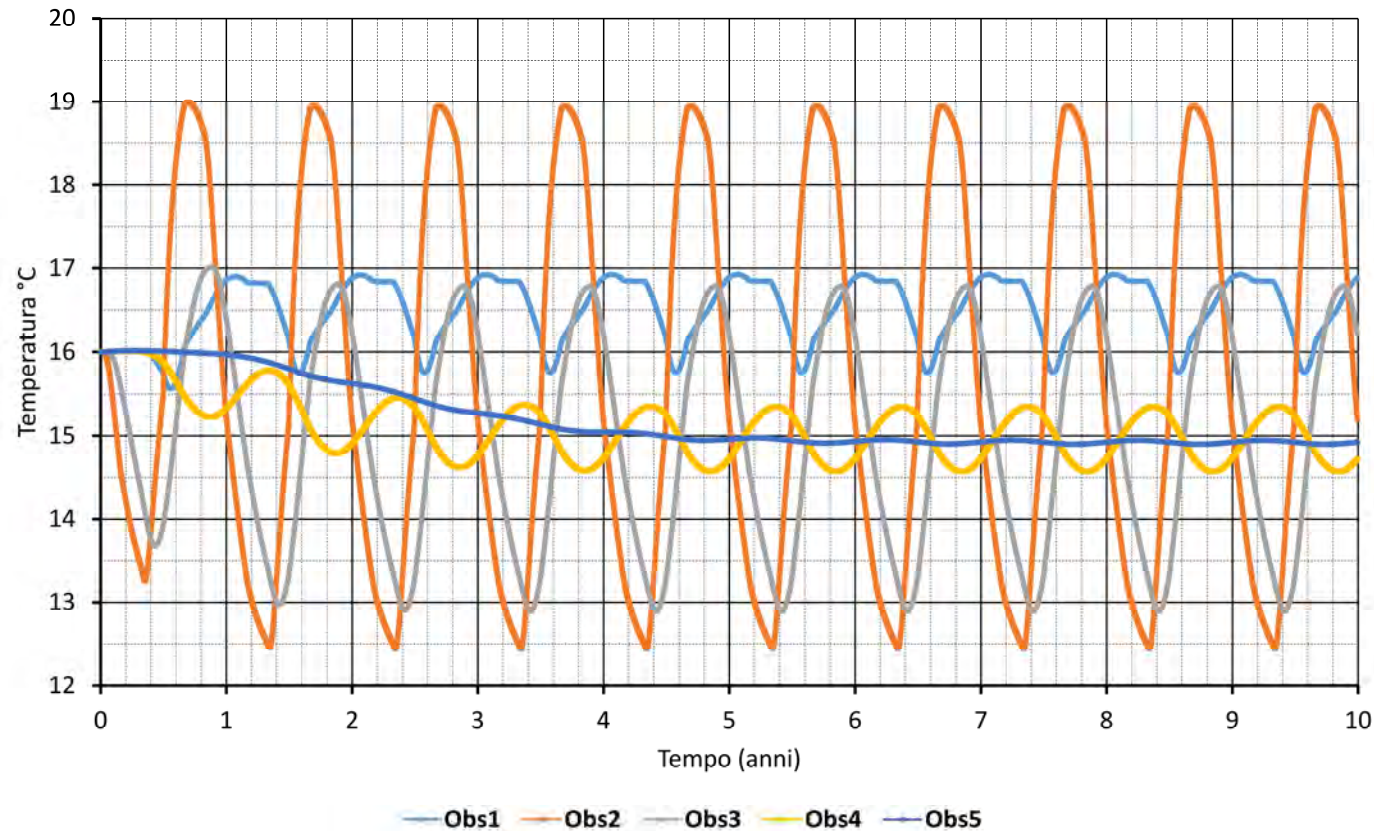
Bimestre 60 (nov-dic)



# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

| Periodo    | Bimestre | Q (m <sup>3</sup> /s) | T out (°C) |
|------------|----------|-----------------------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035                 | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022                 | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042                 | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074                 | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031                 | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039                 | 10.5       |

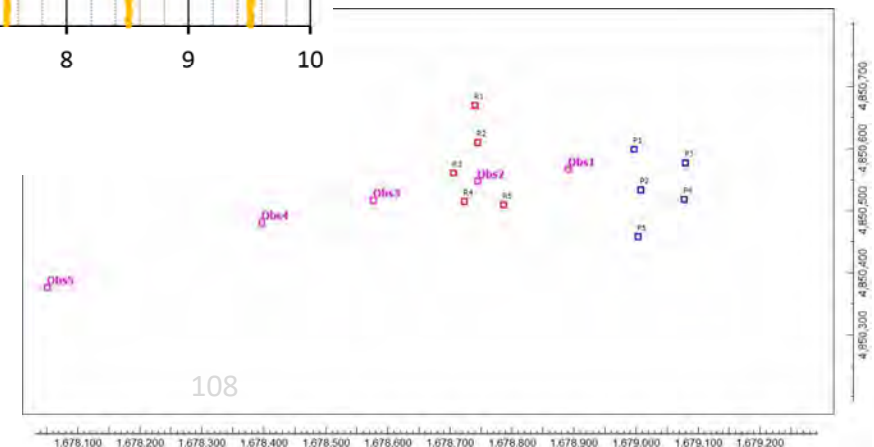
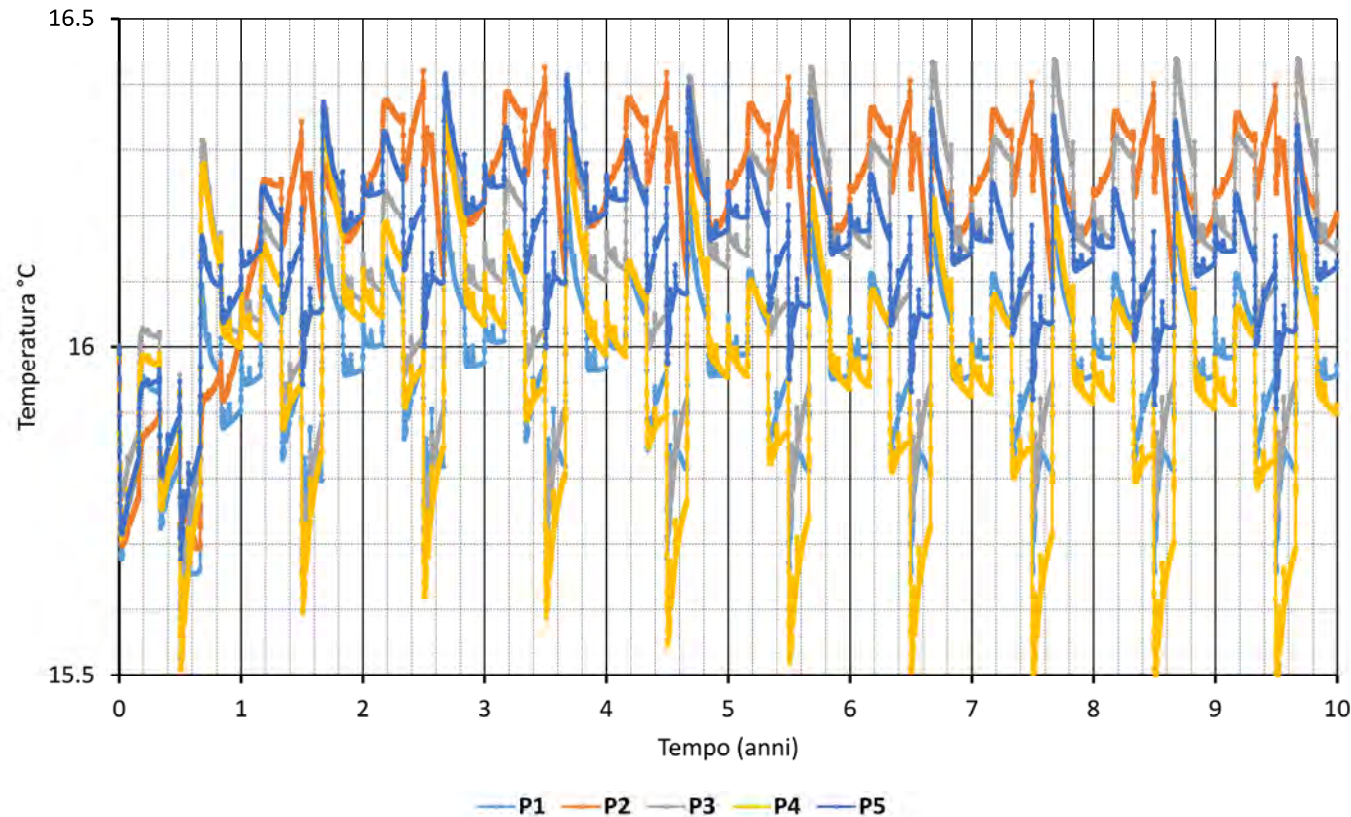
Andamento delle temperature nel tempo



# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo

| Periodo    | Bimestre | Q (m <sup>3</sup> /s) | T out (°C) |
|------------|----------|-----------------------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035                 | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022                 | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042                 | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074                 | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031                 | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039                 | 10.5       |

Andamento delle temperature nel tempo



# Problema reale – Modello Toscana 5 + 5 – Temperature nel tempo



| Periodo    | Bimestre | Q (m <sup>3</sup> /s) | T out (°C) |
|------------|----------|-----------------------|------------|
| Gen - Feb  | 1        | 0.035                 | 10.0       |
| Mar - Apr  | 2        | 0.022                 | 10.9       |
| Mag - Giu  | 3        | 0.042                 | 18.7       |
| Lug - Ago  | 4        | 0.074                 | 19.8       |
| Sett - Ott | 5        | 0.031                 | 16.3       |
| Nov - Dic  | 6        | 0.039                 | 10.5       |

Andamento delle temperature nel tempo

