

Padova, 5 12 2012

# Il calcolo semplificato della deriva termica nel terreno

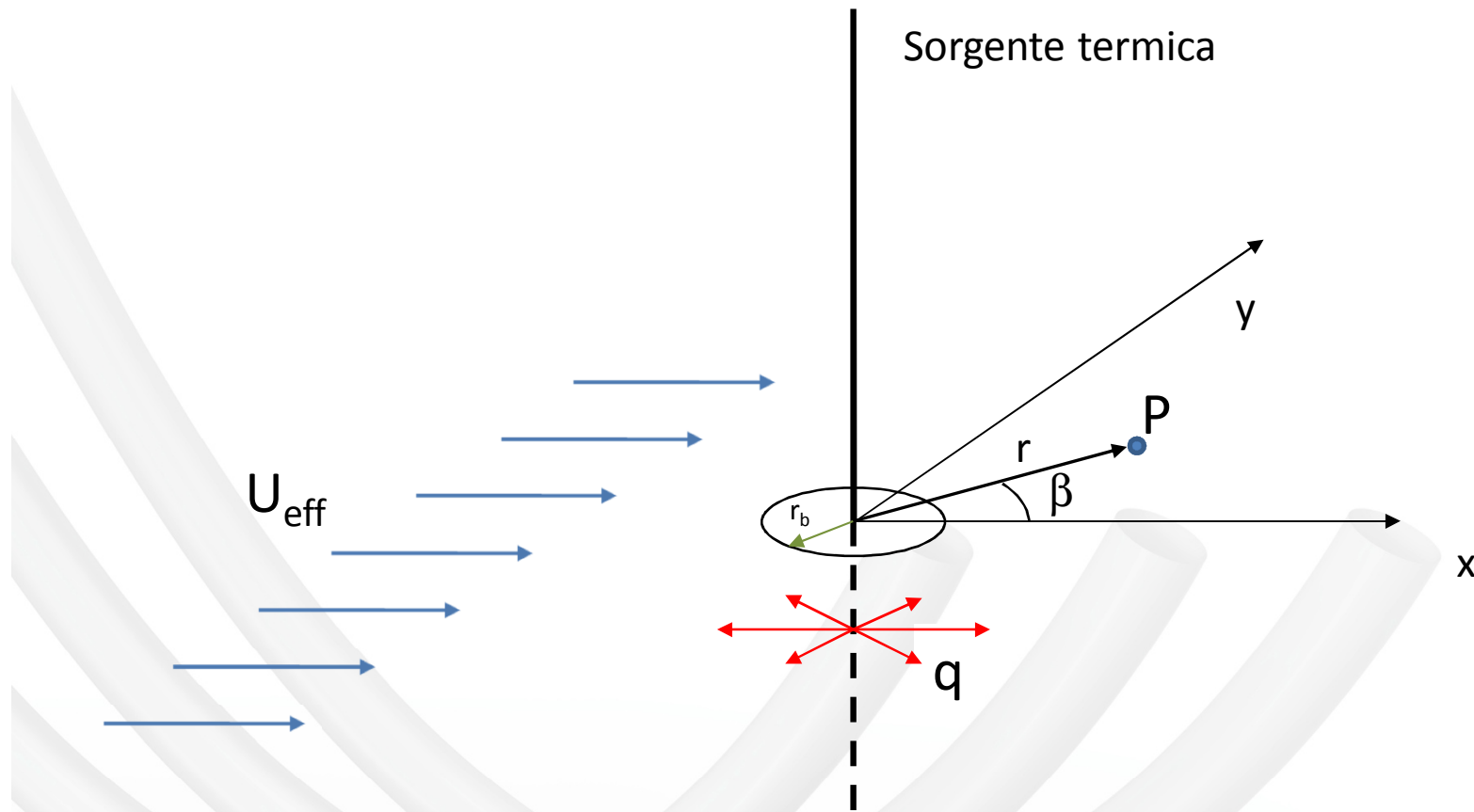
A . Capozza



## Modello matematico sonda verticale: ipotesi

- Terreno: proprietà costanti e omogenee
- Sorgente: lineare e infinita (no effetti di bordo)
- Temperatura iniziale terreno costante
- Flusso termico sorgente costante
- Terreno saturo
- Velocità di falda orizzontale e uniforme

## Modello matematico sonda verticale: ipotesi



## Modello matematico sonda verticale singola

- Soluzione analitica in assenza di moto

$$\Delta T(r, t) = T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda_{eff}} \int_{X^2}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad X = \frac{r}{2\sqrt{\alpha_{eff} t}}$$

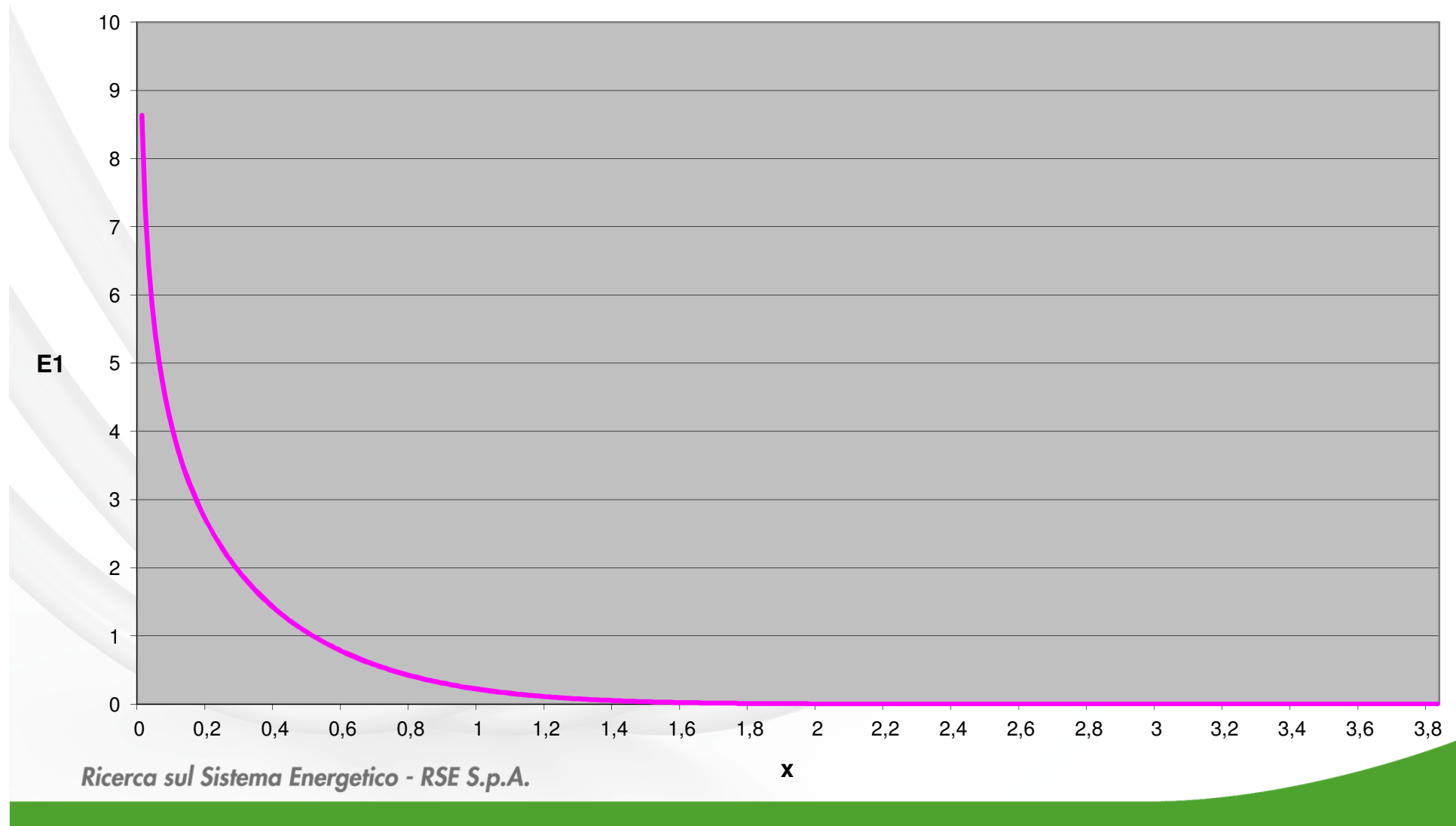
- Soluzione analitica in presenza di moto

$$\Delta T(r, \beta, t) = T(r, \beta, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda_{eff}} \exp\left[\frac{Pe}{2} \cdot \bar{r} \cdot \cos(\beta)\right] \cdot \Gamma\left(0; \frac{\bar{r}^{-2}}{4Fo}; \frac{Pe^2 \bar{r}^{-2}}{16}\right)$$

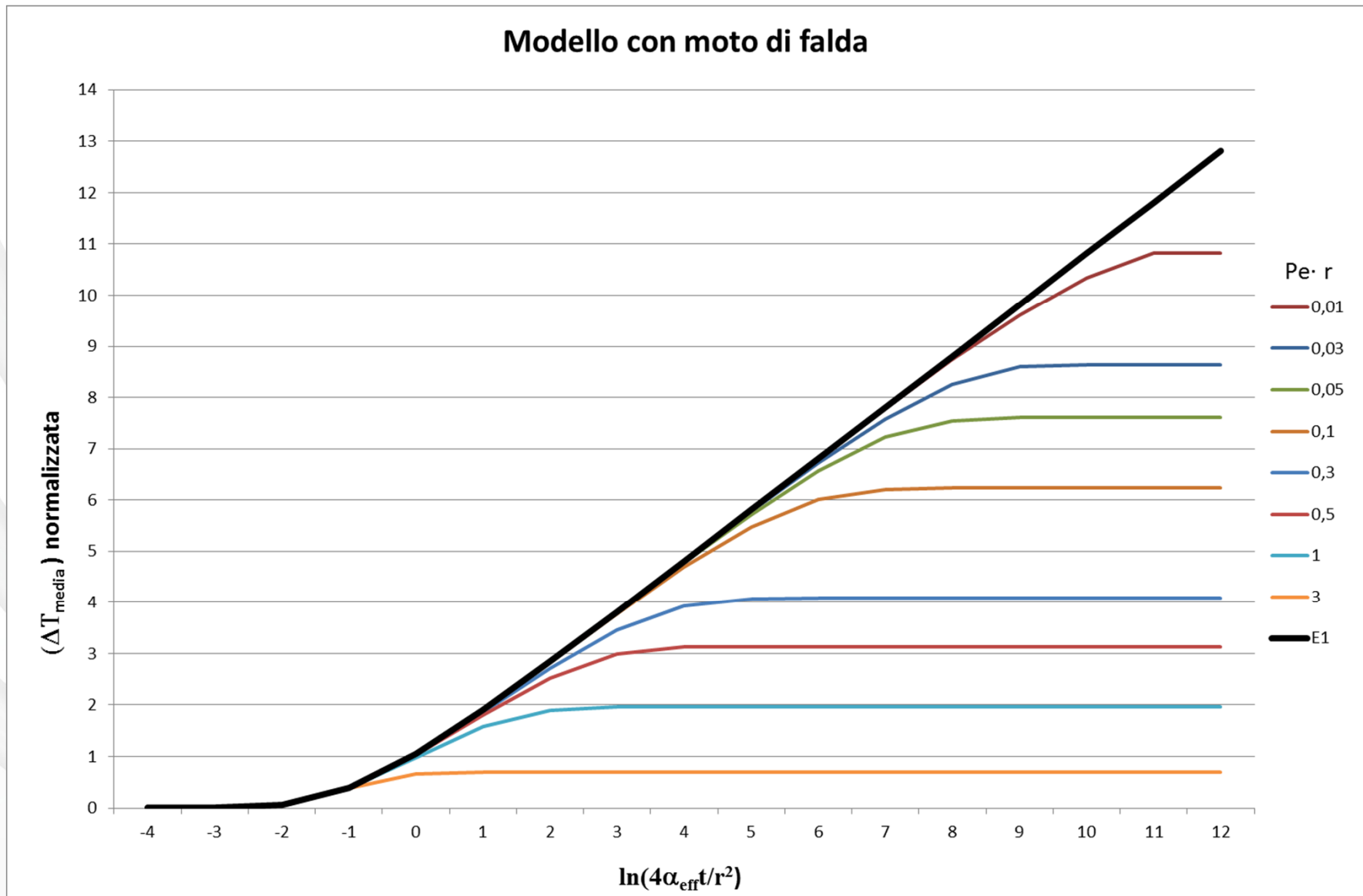
$$\Gamma(\alpha, x, z) = \int_x^{\infty} t^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(t+\frac{z}{t}\right)} \cdot dt \quad \bar{r} = \frac{r}{r_b} \quad Fo = \frac{\alpha_{eff} \cdot t}{r_b^2} \quad Pe = \frac{U_{eff} \cdot r_b}{\alpha_{eff}}$$

# Modello matematico sonda verticale singola

funzione integrale esponenziale

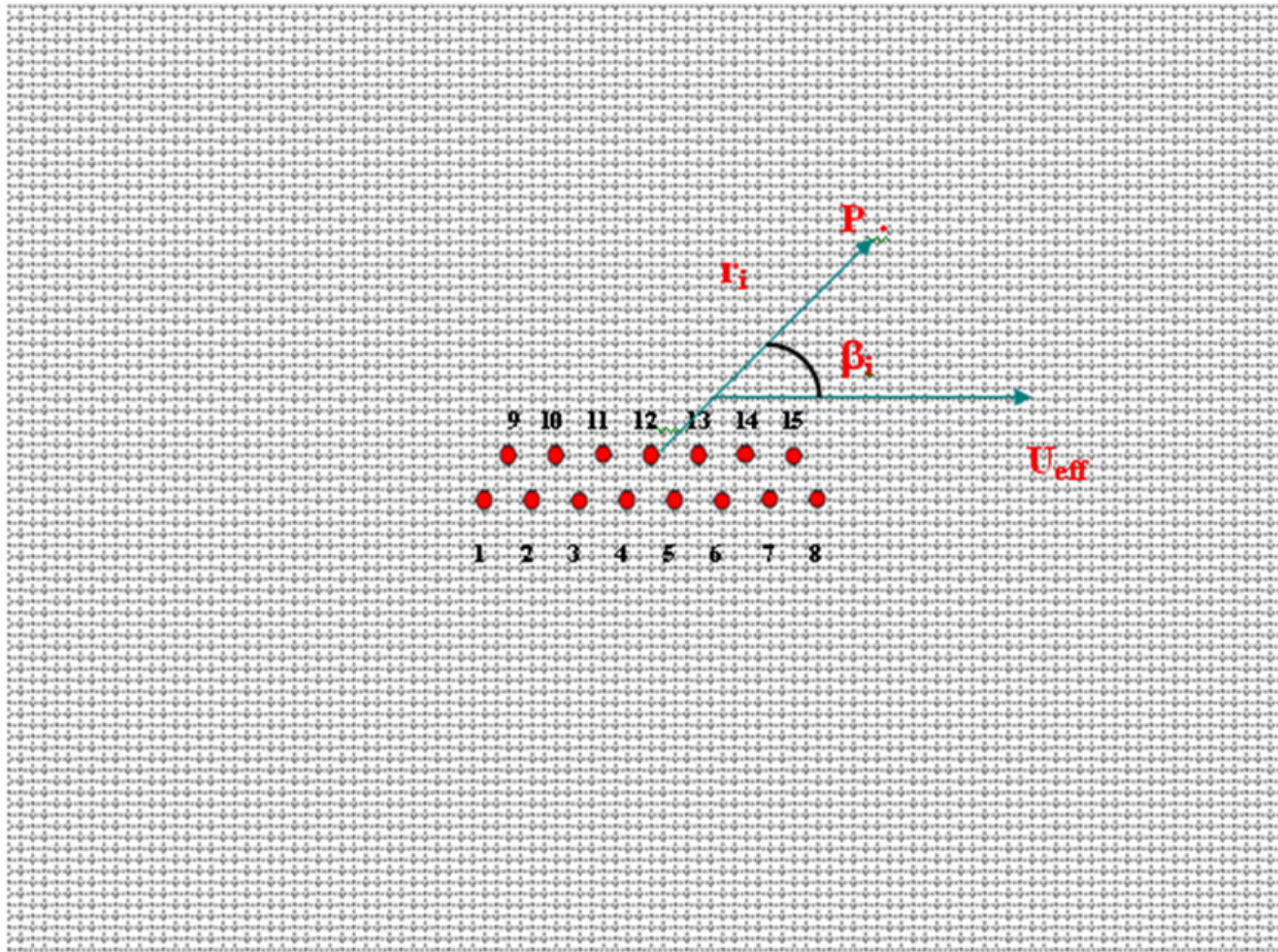


# Modello matematico sonda verticale singola



# Modello matematico con NB sonde verticali

$$T(x_P, y_P, t) = T_0 + \sum_{i=1}^{NB} \Delta T(r_i, \beta_i, t)$$



# LENGTH

## Valutazione della deriva termica da sonde verticali

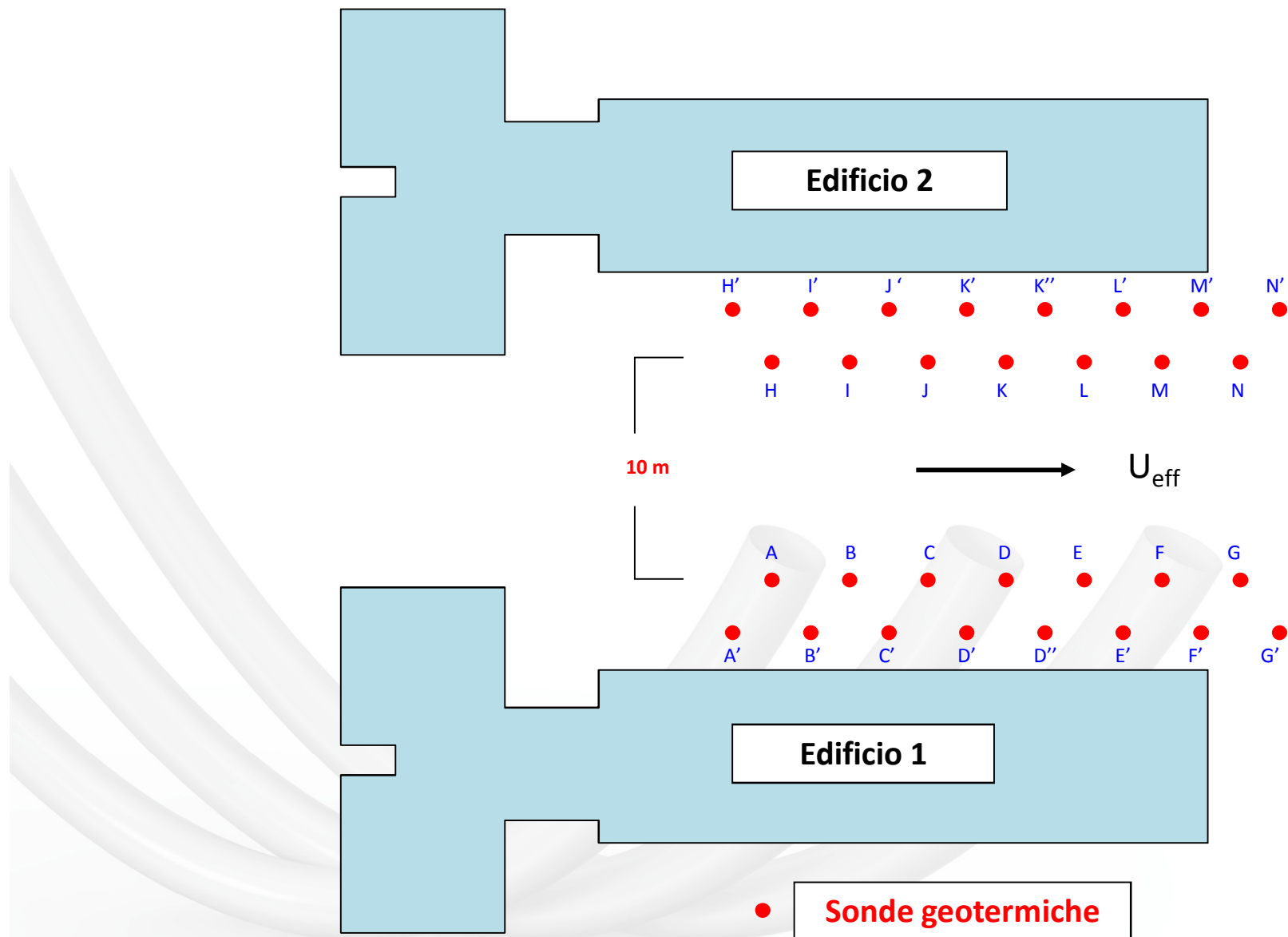
- Possibilità di interazione tra campi geotermici di impianti distinti
- Presenza o meno di moto di falda
- Scambio termico al terreno uniforme o dipendente dalla sonda
- **Utilizzo di soluzione analitica su foglio di calcolo:**
  - l'accuratezza non dipende dal numero di punti di calcolo (la grafica sì)
  - non necessita di pre-processor per la discretizzazione
  - non necessita di post-processor per la visualizzazione

## Un caso reale



Sonde geotermiche

## Un caso reale



## Un caso reale

- 2 edifici, ciascuno di 12 appartamenti di 80 m<sup>2</sup>
- Solo riscaldamento
- Fabbisogno invernale di 173.000 kWh/anno
- Potenza termica a 0°/35° : 66,7 kW
- COP medio stagionale: 3,14
- Calore sottratto al terreno: 118.260 kWh/anno
- 15 sonde distanti 4,5 m e profonde 100 m

## Un caso reale

### Grandezze principali

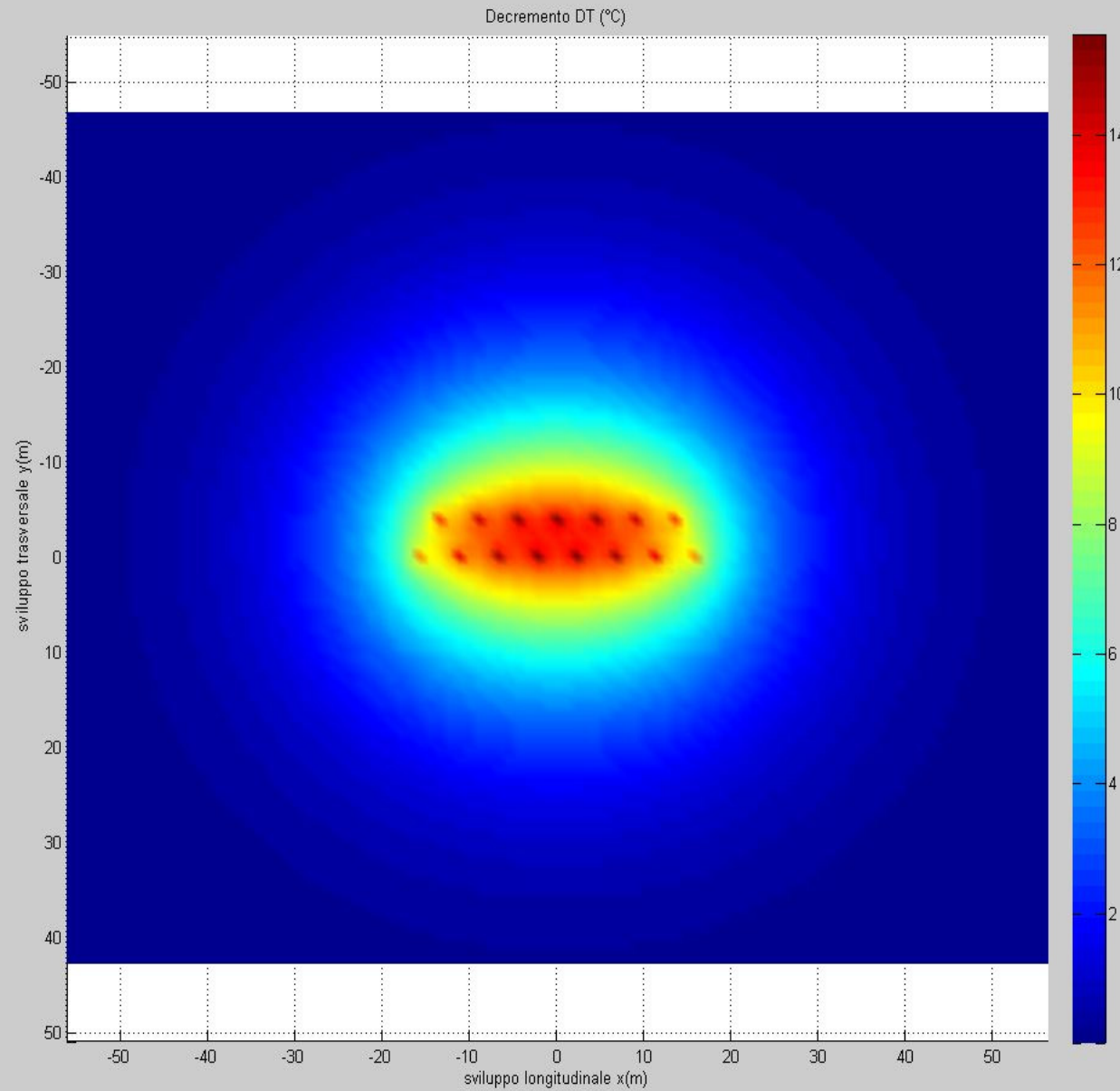
• $C_s$	1,67	MJ/m <sup>3</sup> K	capacità termica volumica terreno ( $\rho_s c_s$ )
• $C_f$	4,18	MJ/m <sup>3</sup> K	capacità termica volumica liquido ( $\rho_f c_f$ )
• $\dot{Q}_a$	13.465	W	potenza (media annua) sottratta al terreno
• $L$	1.500	m	lunghezza totale sonda
• $\lambda_s$	2,36	W/mK	conducibilità terreno
• $\lambda_f$	0,60	W/mK	conducibilità liquido
• $\alpha_s$	$1,42 \cdot 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s	diffusività termica terreno
• $\alpha_f$	$1,44 \cdot 10^{-7}$	m <sup>2</sup> /s	diffusività termica liquido
• $U$	7,72	m/anno	velocità di Darcy
• $\phi$	0,30	-	porosità
• $r_b$	0,05	m	raggio perforazione

### Grandezze derivate

• $\lambda_{eff}$	1,83	W/mK	conducibilità termica efficace
• $\alpha_{eff}$	$7,56 \cdot 10^{-7}$	m <sup>2</sup> /s	diffusività termica efficace
• $C_{eff}$	2,42	MJ/m <sup>3</sup> K	capacità termica volumica efficace
• $U_{eff}$	4,00	m/anno	velocità efficace

# Moto di falda nullo – 1 impianto

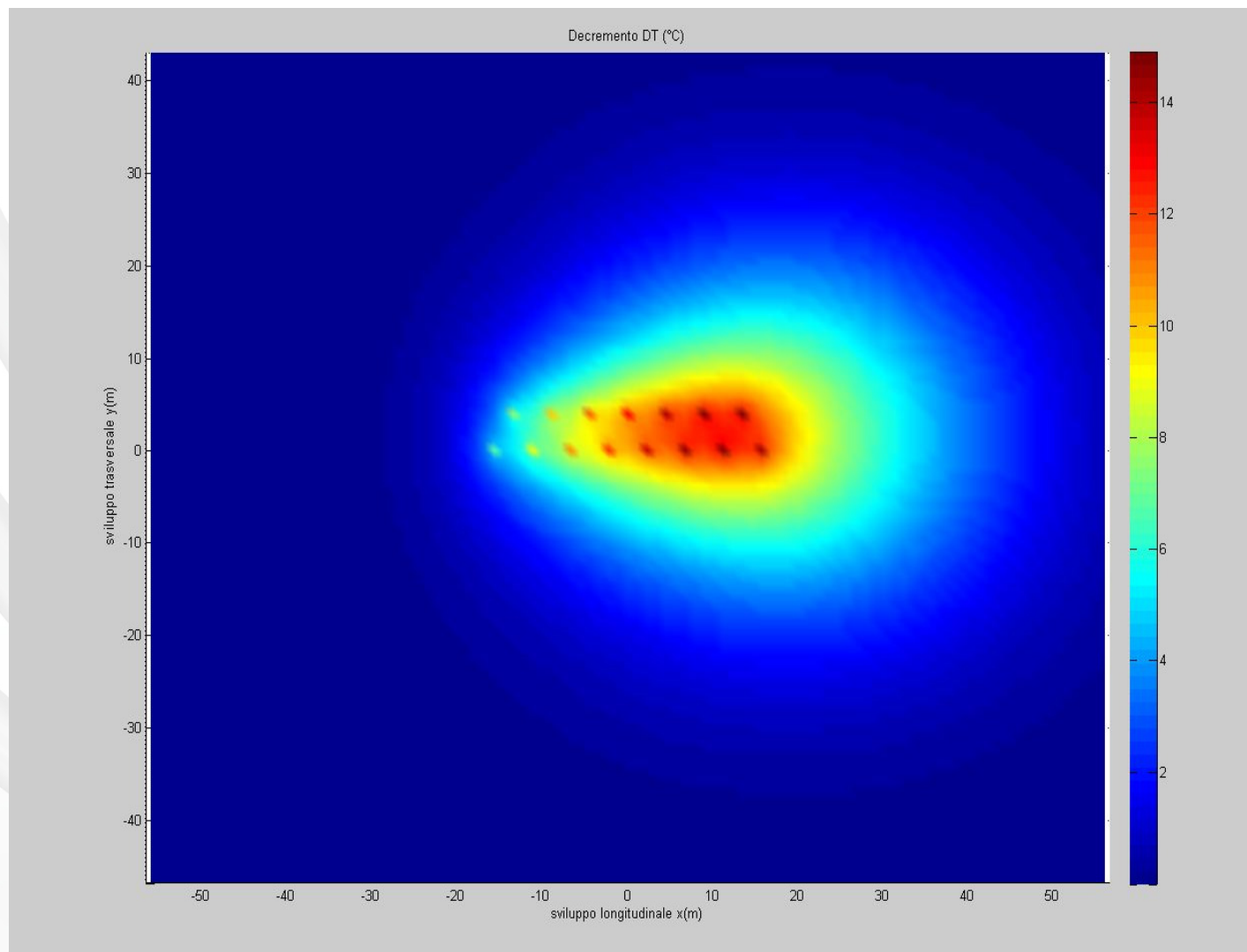
$\Delta t_{max} = -15,5^{\circ}\text{C}$



## Moto di falda - 1 impianto

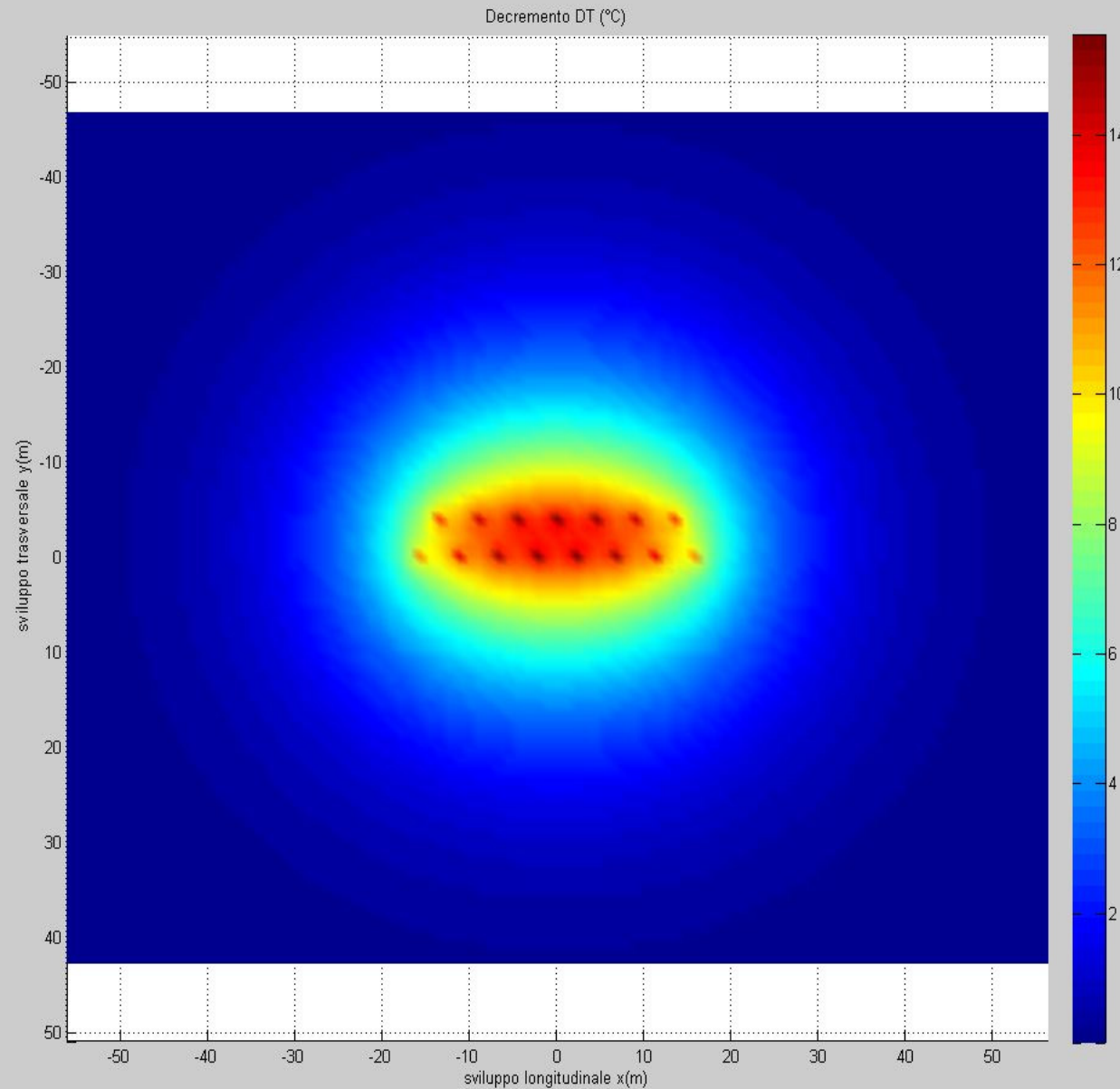
$\Delta t_{\max} = -14,9^{\circ}\text{C}$  (10 anni)

$\Delta t_{\max} = -24,7^{\circ}\text{C}$  (regime)



# Moto di falda nullo – 1 impianto

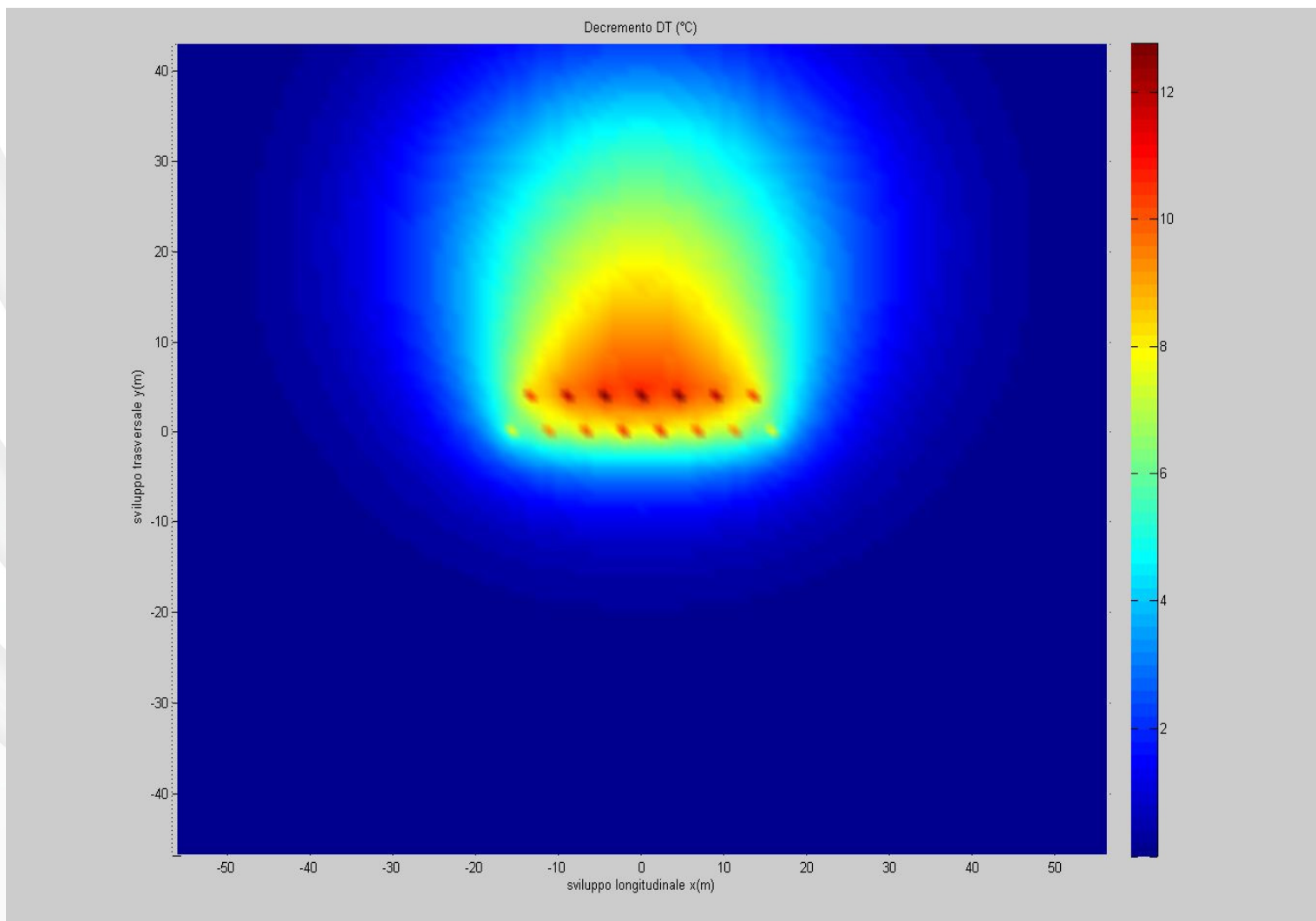
$\Delta t_{max} = -15,5^{\circ}\text{C}$



## Moto di falda - 1 impianto

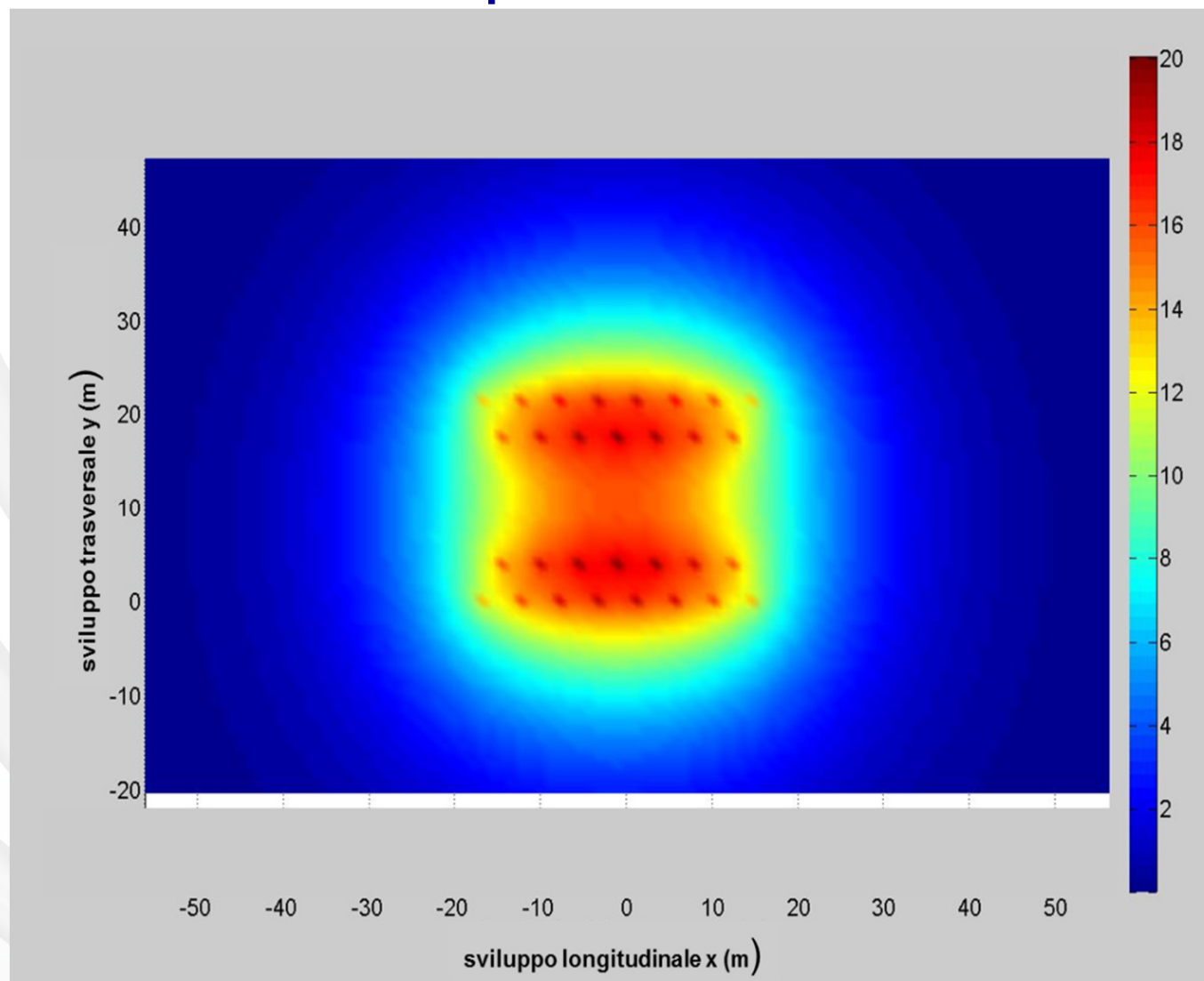
$\Delta t_{\max} = -12,7^{\circ}\text{C}$  (10 anni)

$\Delta t_{\max} = -19,3^{\circ}\text{C}$  (regime)



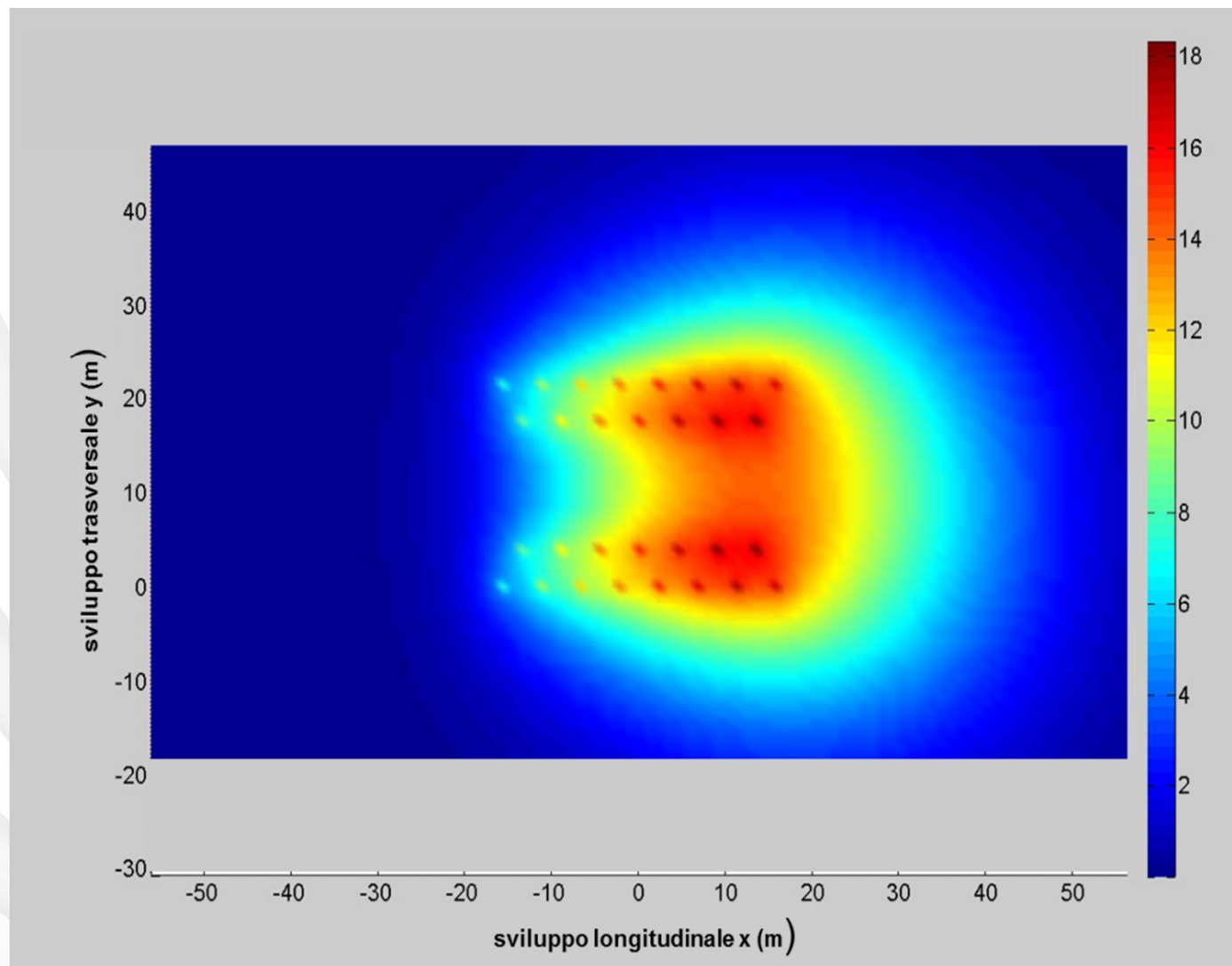
## E con un nuovo impianto? Senza falda

$\Delta t_{\max} = -20,0^{\circ}\text{C}$  (10 anni)



## E con un nuovo impianto?

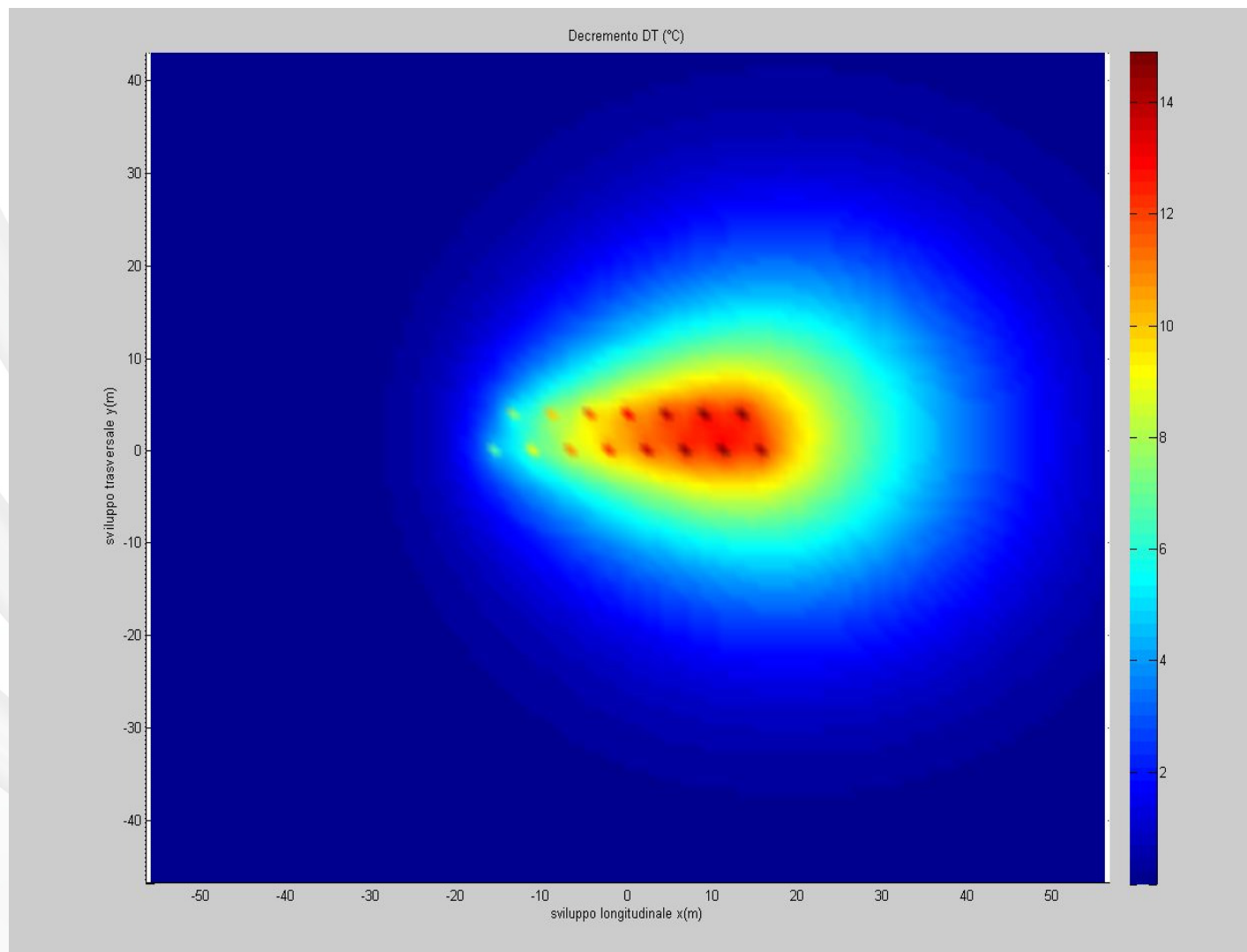
$\Delta t_{\max} = -18,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (10 anni)



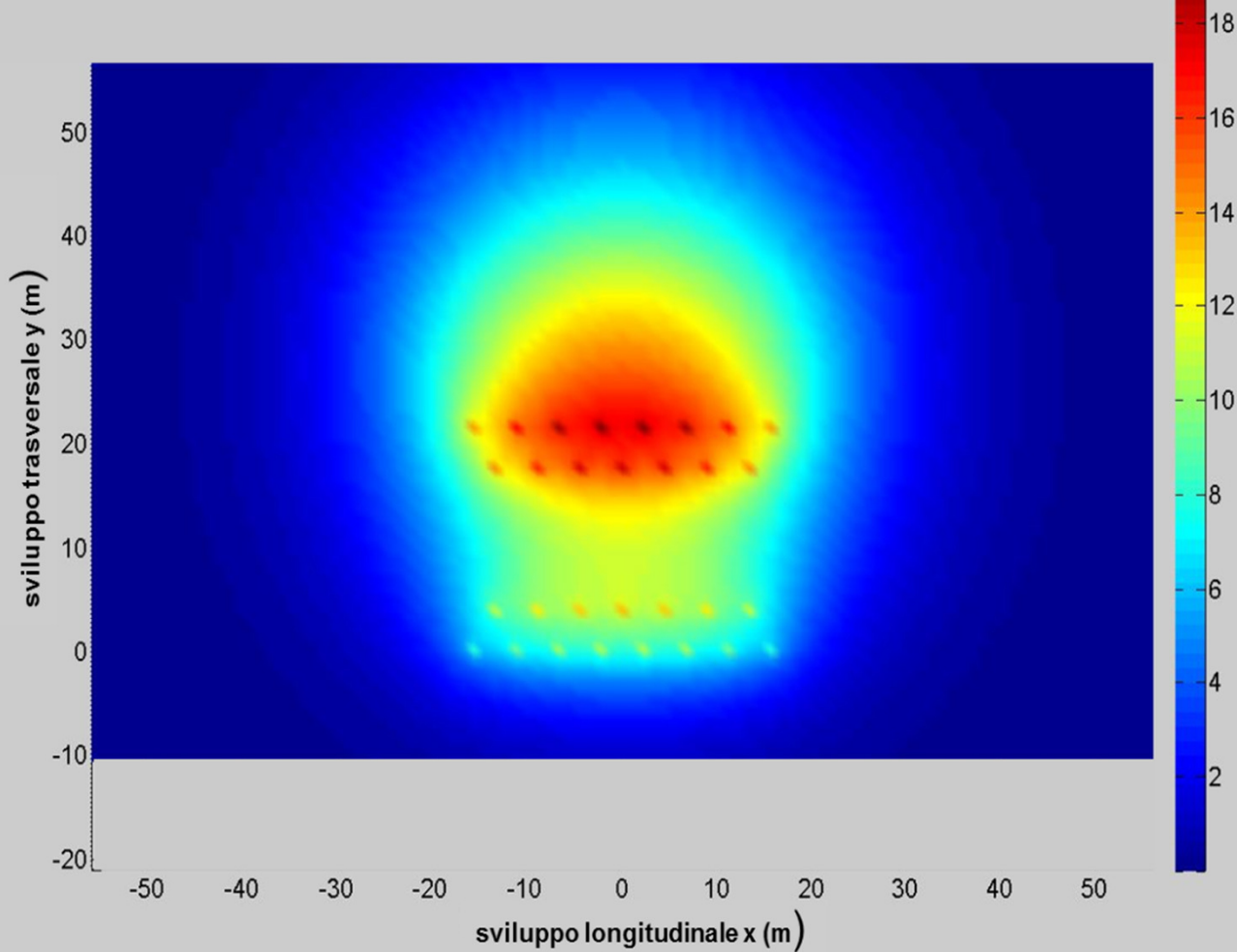
$U = 4 \text{ m/anno}$

E con un nuovo impianto?

$\Delta t_{max} = -14,9^{\circ}\text{C}$  (10 anni)



**E con un nuovo impianto?**  $\Delta t_{\max} = -19,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (10 anni)



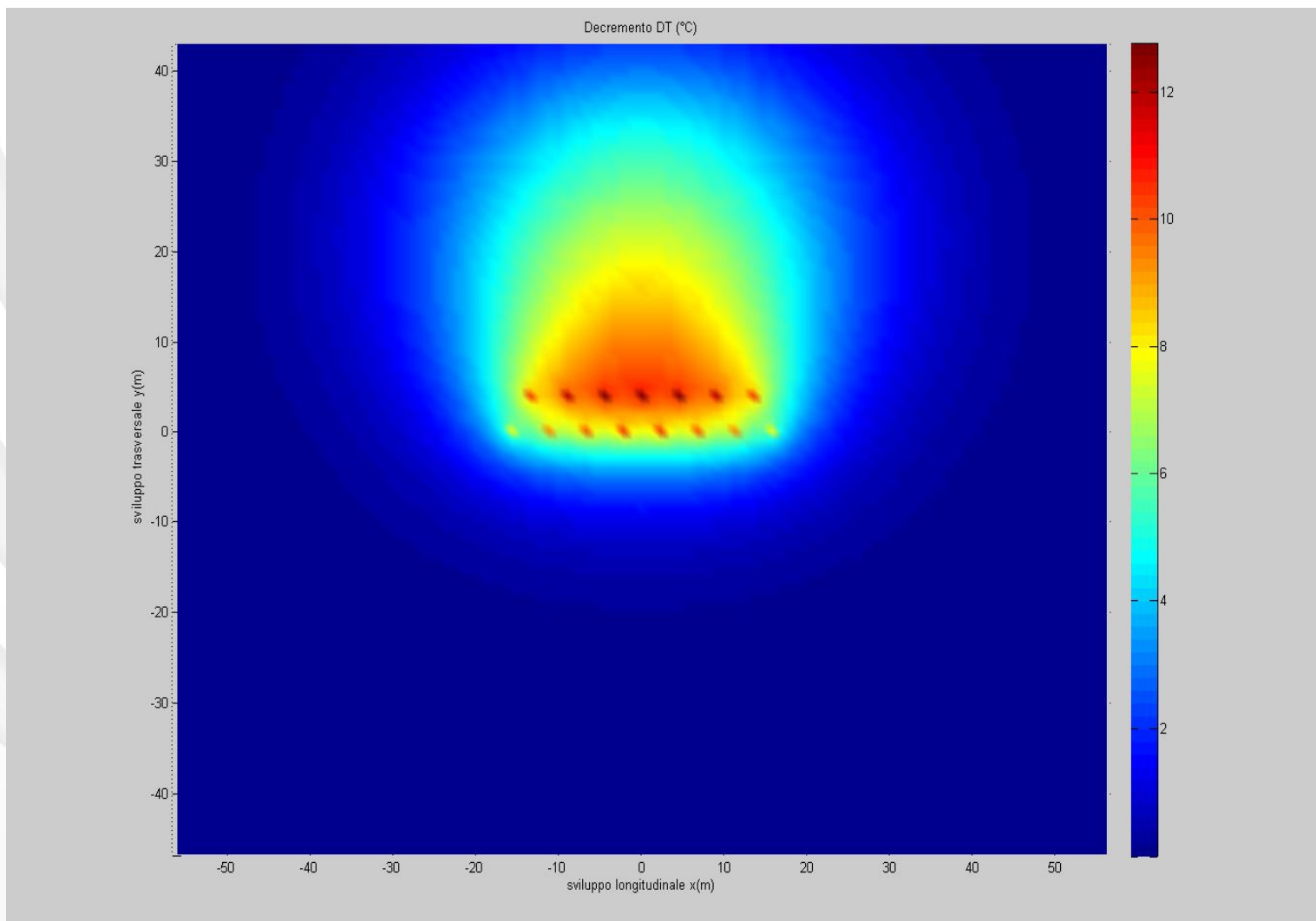
$U_{\text{eff}}$



$U = 4 \text{ m/anno}$

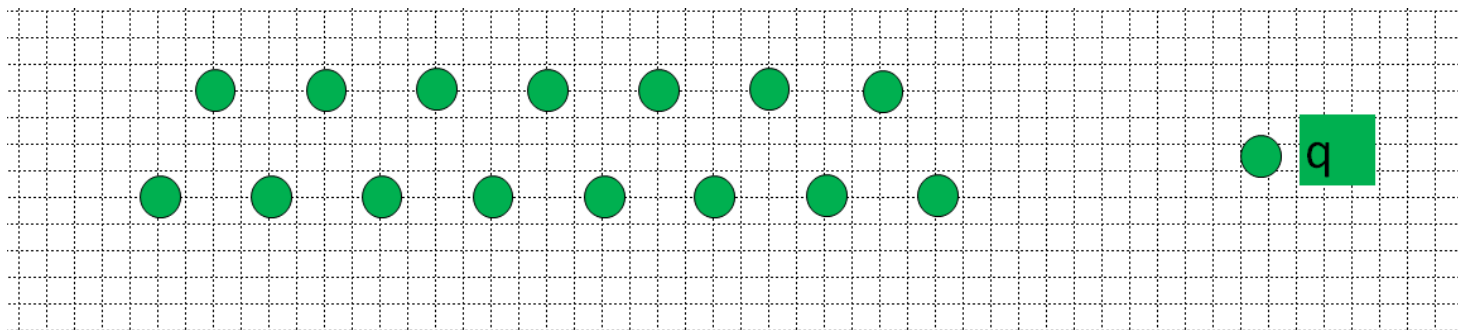
E con un nuovo impianto?

$\Delta t_{max} = -12,7^{\circ}\text{C}$  (10 anni)

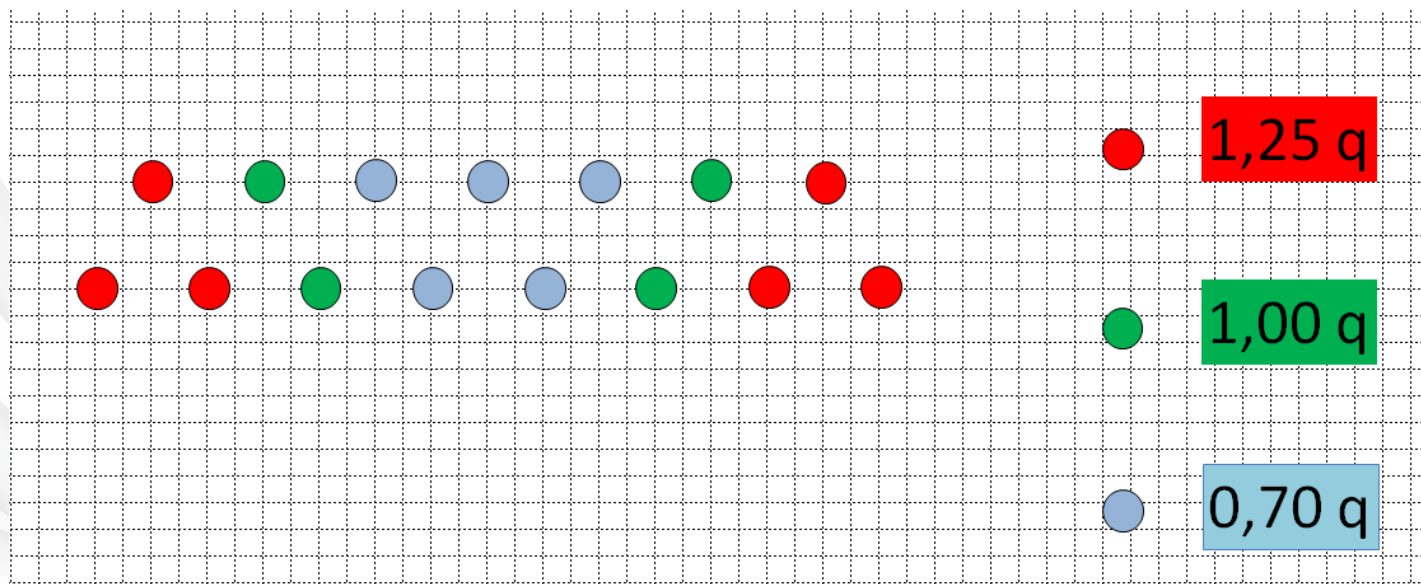


## Riequilibrio flussi specifici

Da:

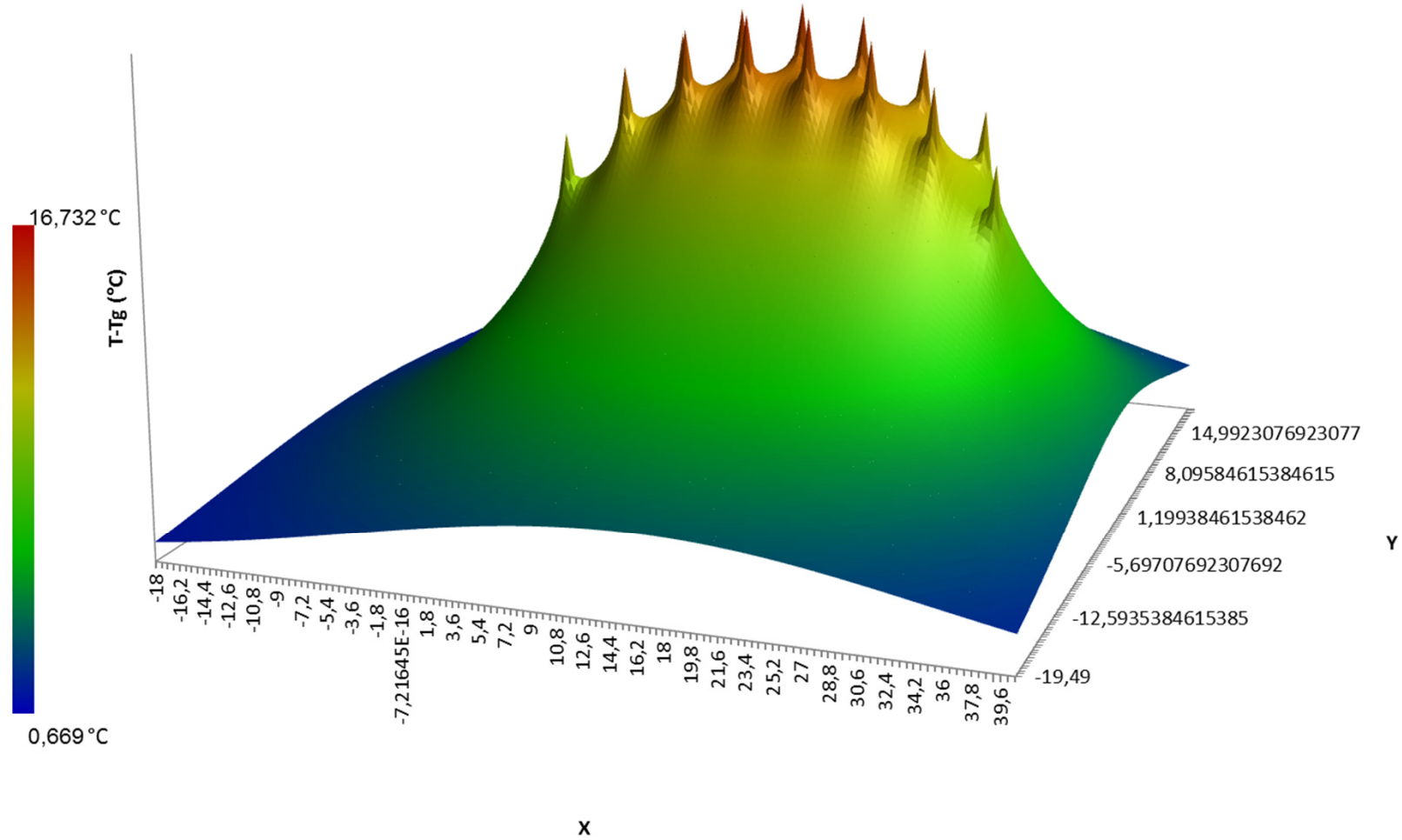


A:



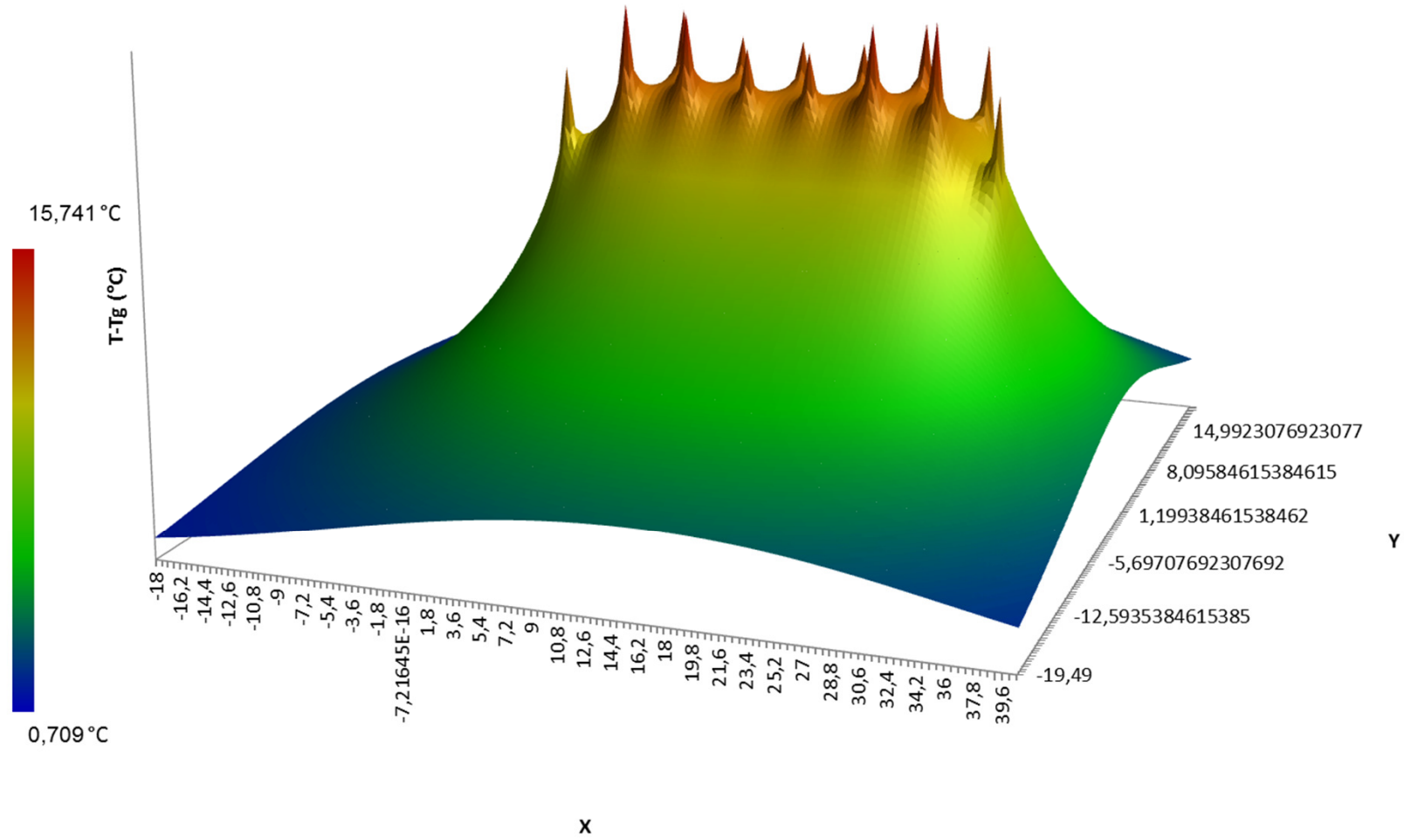
# Riequilibrio flussi specifici senza falda - prima

## Variazione di Temperatura (3D)



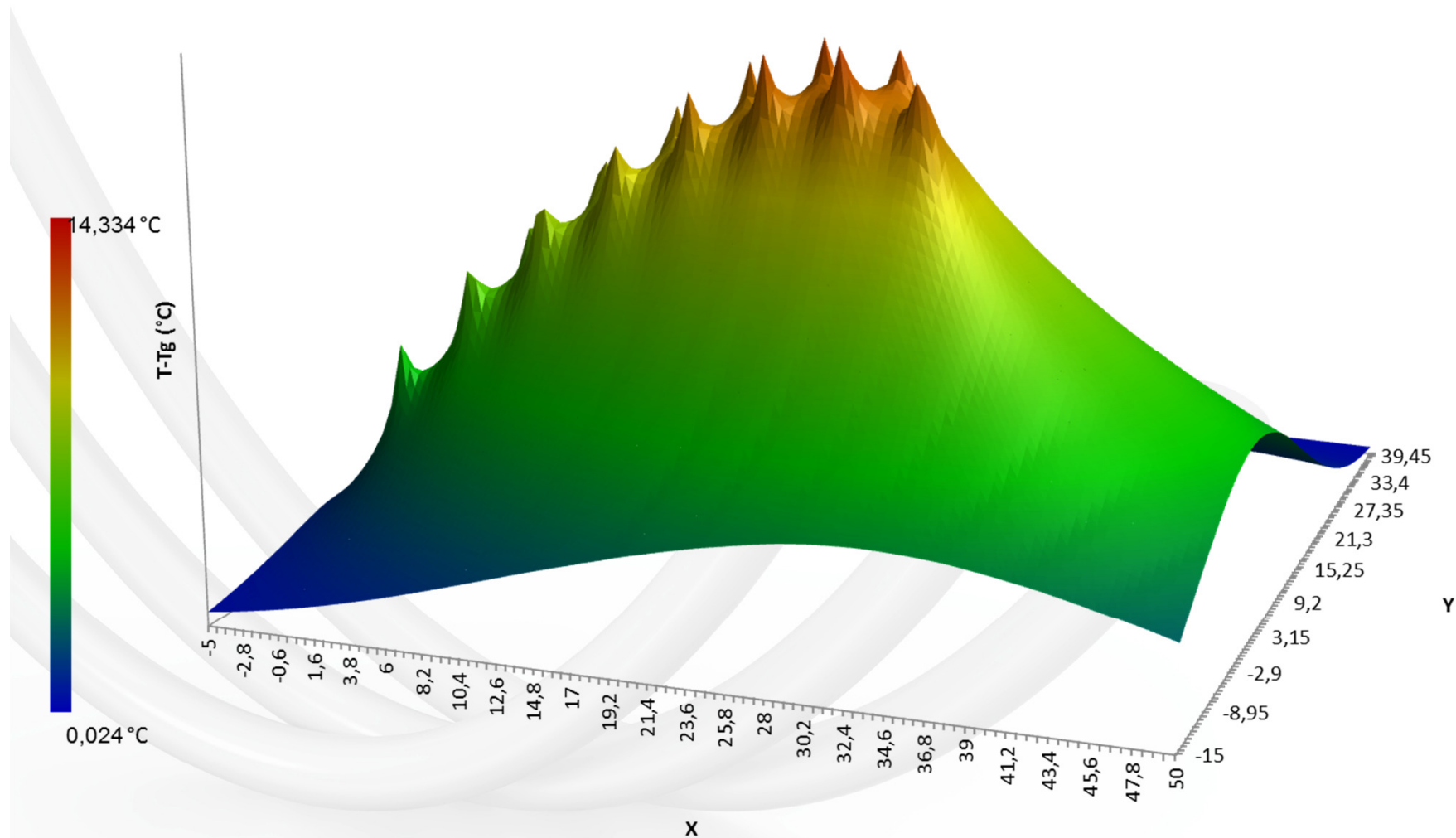
# Riequilibrio flussi specifici senza falda - poi

## Variazione di Temperatura (3D)



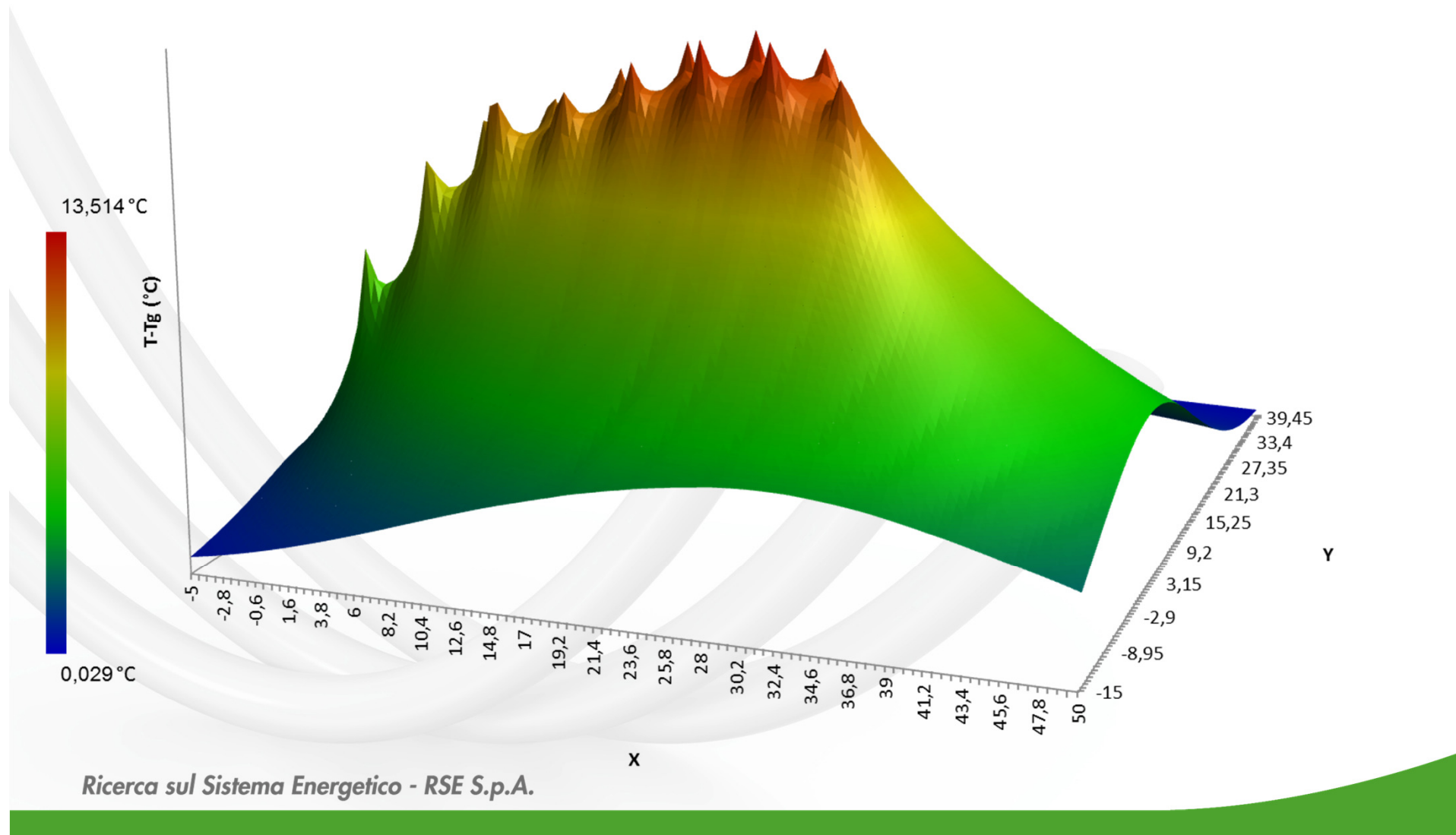
# Riequilibrio flussi specifici con falda - prima

## Variazione di Temperatura (3D)



# Riequilibrio flussi specifici con falda – poi (piccato a monte)

## Variazione di Temperatura (3D)



## Il package geotermico RSE

- Gratuitamente disponibile su richiesta
- **LENGTH**: deriva termica nel terreno originata da un cluster di sonde verticali, in presenza di moto di falda o meno
- **IGSHPA**: progettazione di campi geotermici orizzontali secondo procedura IGSHPA
- **ASRHAЕ**: progettazione di campi geotermici verticali secondo procedura ASHRAE
- **TgCalc**: andamento temporale della temperatura degli strati superficiali del terreno in conseguenza delle variazioni climatiche

## Grazie per l'attenzione

A. Capozza: Studi modellistici e sperimentali sull'interazione tra pompe di calore geotermiche e il terreno, RSE 12000316, 2012

<http://www.rse-web.it/documenti/documento/314725>

e altri sullo stesso sito.

-----  
Antonio Capozza

RSE S.p.A.

Dipartimento Sviluppo dei Sistemi Elettrici

Via Rubattino, 54

20134 Milano

Tel. +39 02 3992 5016

Fax +39 02 3992 5597

e-mail [antonio.capozza@rse-web.it](mailto:antonio.capozza@rse-web.it)

Web [www.rse-web.it](http://www.rse-web.it)  
-----