



dipl. geol. G.P. DROLI hydrogeologist U.E. certified
(D.E.A. Master-Specialisé, Ecole Nationale des Mines de Paris)

- *Hydraulic projects, Quantitative solutions for Water management and hydrogeology*
- *Development of renewable energies from water: geothermal, hydroelectric, biomass*
- *Research & Development of water plants in drinking, mineral, thermal, geothermal*
- *Mathematical modeling in ground & surface waters, predictive simulations*
- *Water and soil rehabilitation, depollution of aquifer systems, Risk Analysis*
- *Plans & management of water resources, disastements and water crisis*
- *Environmental Impacts and Works Director for water and environmental projects*

UDINE (Italy), Via Cosattini n° 32

Tel: +0432 229424, Fax: +0432 519343, Cell: + 337 532202

mail: geoecoud@tin.it sito: www.geoecitalia.it

FONDAZIONE MUSEO CIVICO ROVERETO

Venerdì 2 dicembre 2016 – ROVERETO (Trento)

LA GEOTERMIA PROFONDA: GEOFISICA E IDRO-GEOLOGIA PER LE PREVISIONI TECNICO-ECONOMICHE DI PRODUZIONE ENERGETICA IN ACQUIFERI CARBONATICI

1 - METODI GEOFISICI

OBIETTIVI DI BASE:

- Definizione **geometria acquifero** scala vasta: per mod-math: 1) analitico e 2) numerico
- **Faglie-fratture**: frequenza (n)
- Grado di fratturazione relativa = **K(m/s)** o **K(darcy)**
- Trasmissività **T(m²/s)**, Porosità = **n_{eff}**
- **Condiz. ai limiti**
- **Condiz. iniziali**

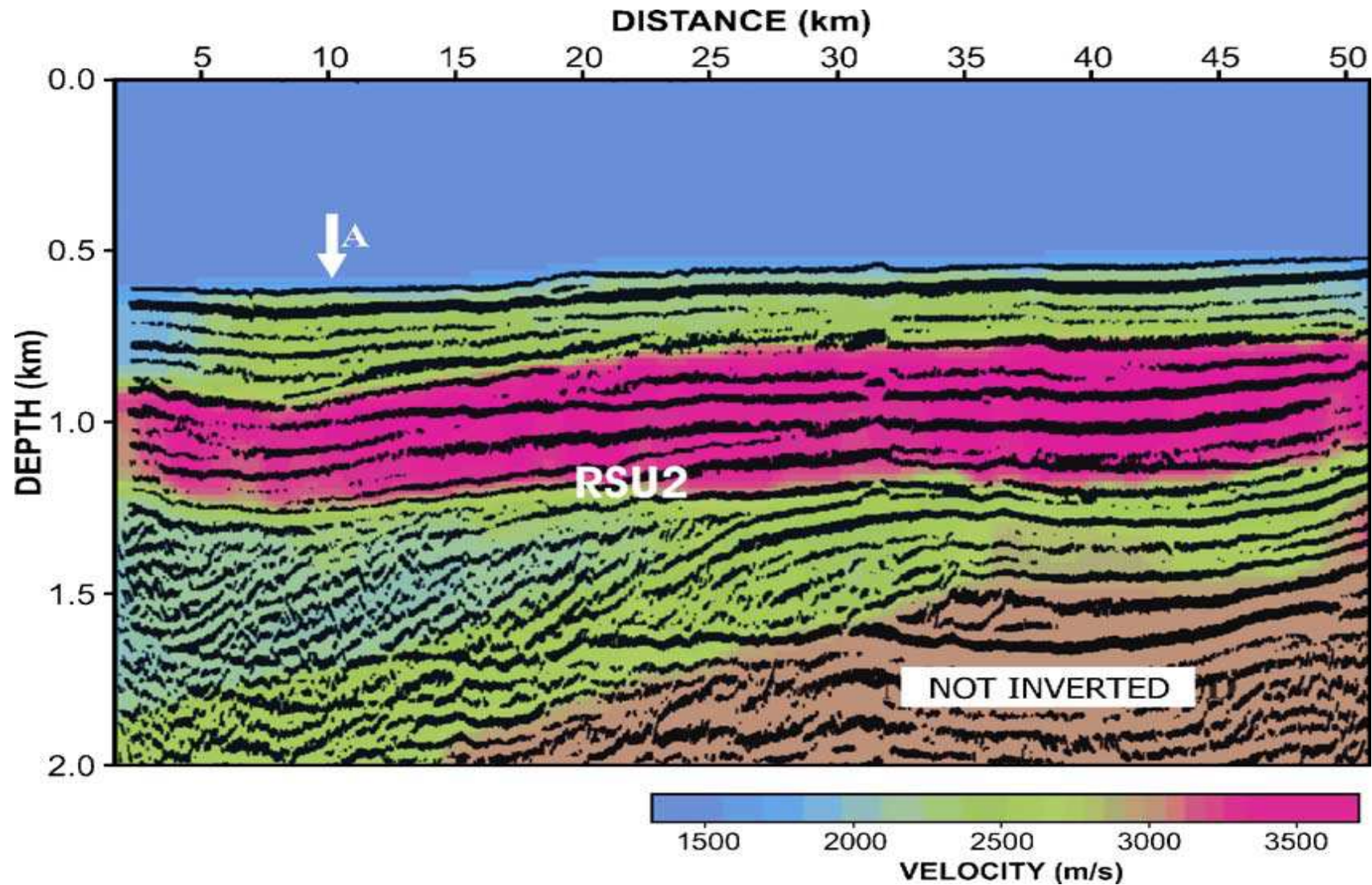
1 - METODI GEOFISICI

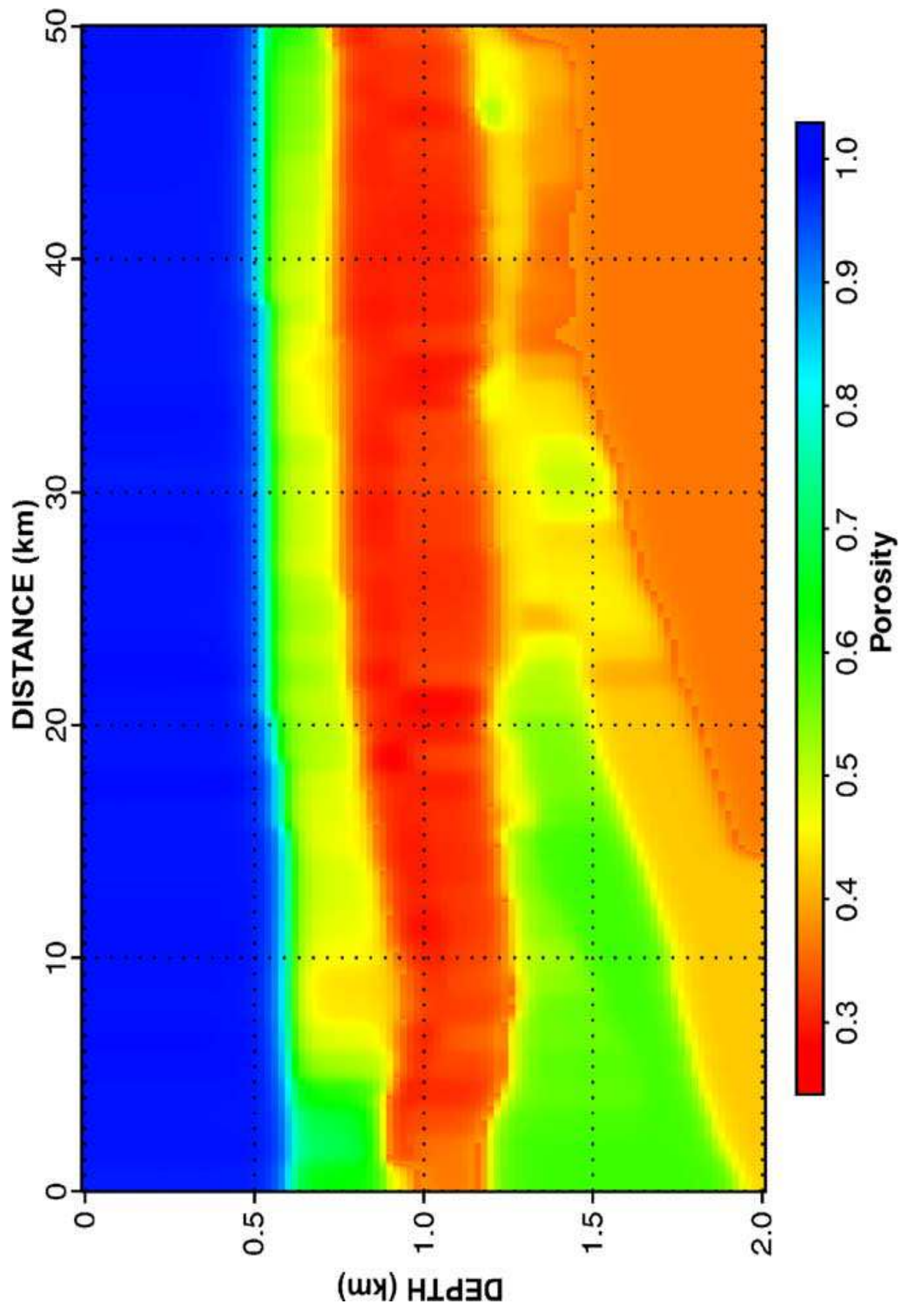
METODI:

- Geofisica riflessione:
 - Geologia-tettonica, faglie-fratture, cond.limiti, continuità idraulica acquifero
 - Target fino a 3.000-5.000m c.a
 - **Grado di eterogeneità e isotropia dell'acquifero, porosità**
- Tomografia sismica riflessione Vp e Vp/Vs:
 - Target fino a 3.000m c.a
 - **Grado di fratturazione roccia = K relativa (cautelativa per calcoli)**
- Geoelettrica dipolo-dipolo 1.000 V, 15 A:
 - Target fino a 3.000-4.000m c.a
 - **Resistività roccia non-satura, satura, fratturazione**
 - Polarizzazione indotta e chargeability

Sismica a riflessione classica:

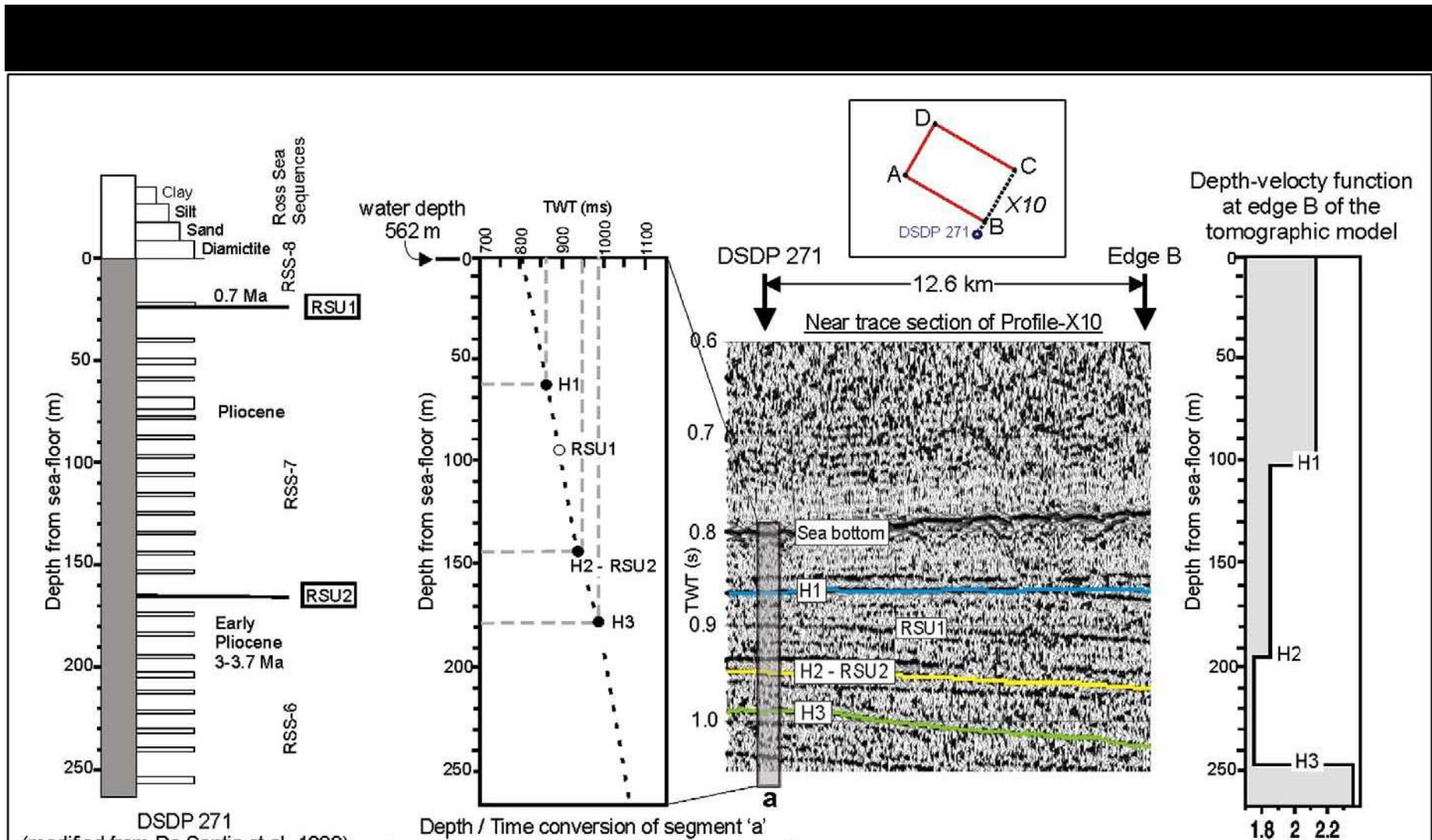
correlazioni Velocità - Porosità



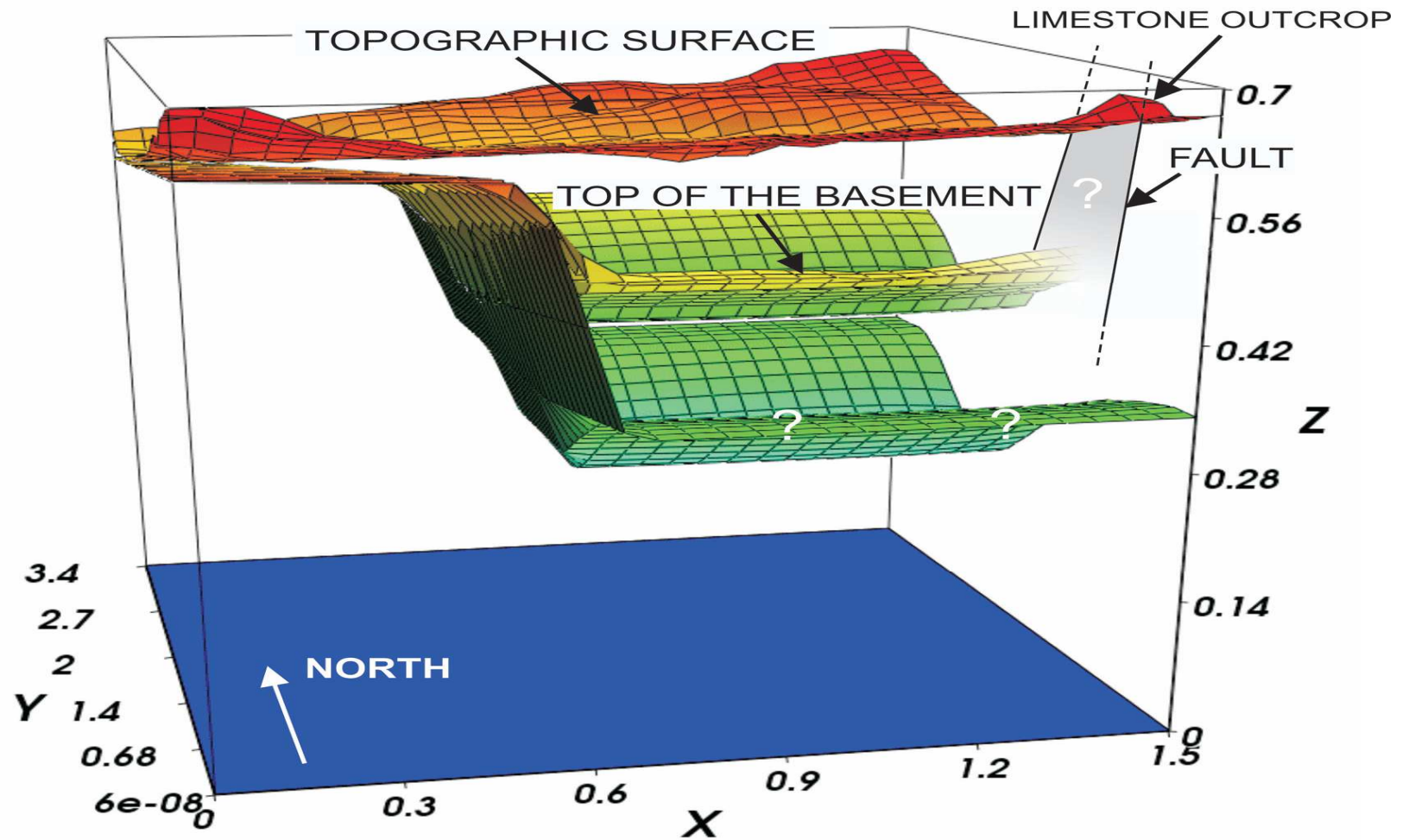


Tomografia a riflessione:

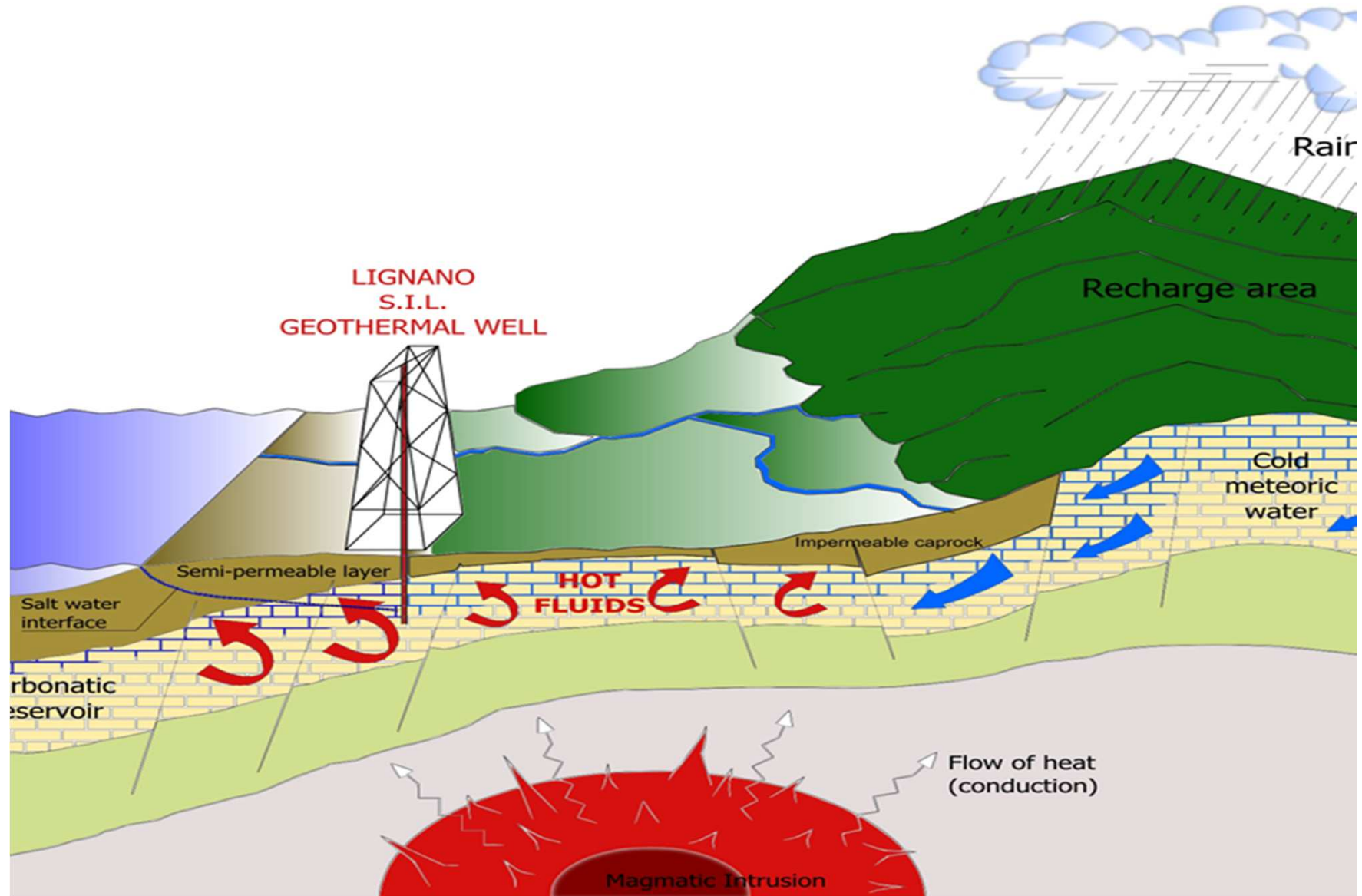
correlazione stratigrafica del profilo sismico DSDP271 e
ricerca dell'intervallo a bassa velocità H2-H3



Esempio di mappa 3D finale



2 – SCHEMA SISTEMA IDRO-GEOTERMICO CARBONATICO



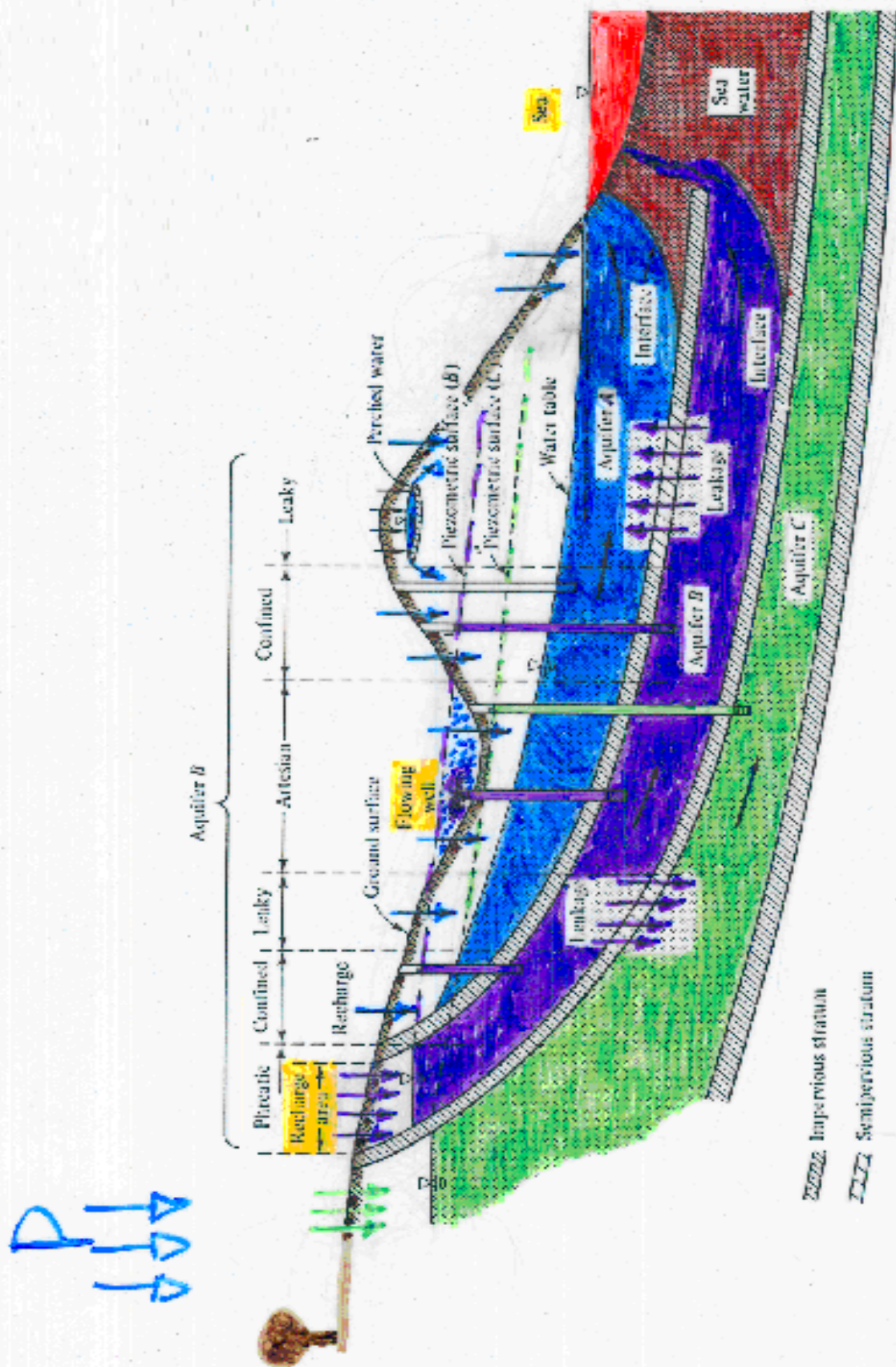
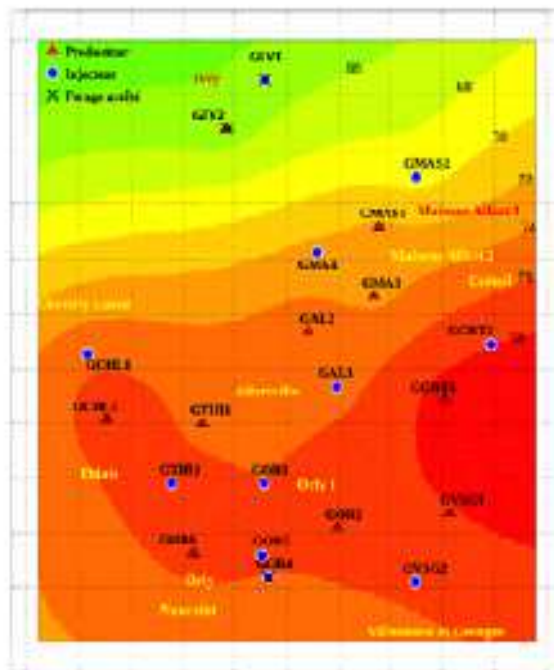


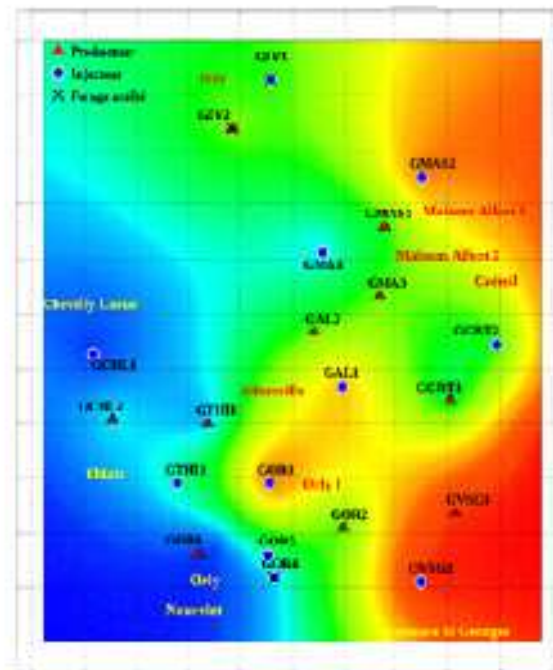
Fig. 1.4 Types of aquifers

3 – CALCOLO ANALITICO E MOD-MATH. NUMERICO: PREVEDERE, MANTENERE E GESTIRE L'IMPIANTO

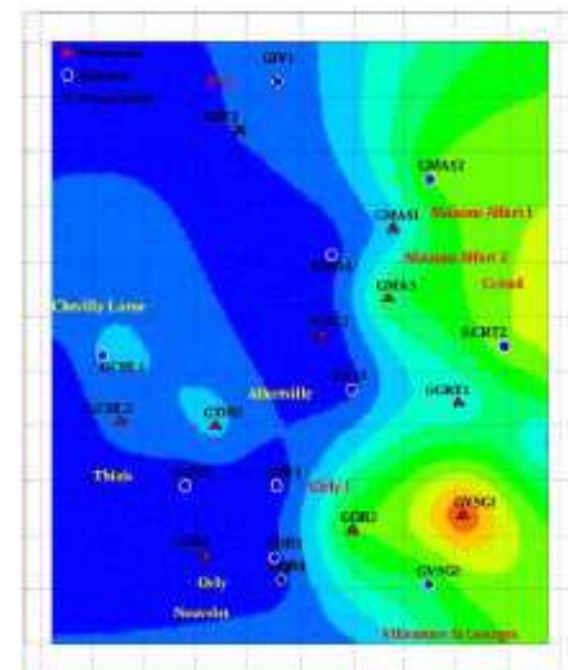
Esempi di risultati cercati con il modello numerico



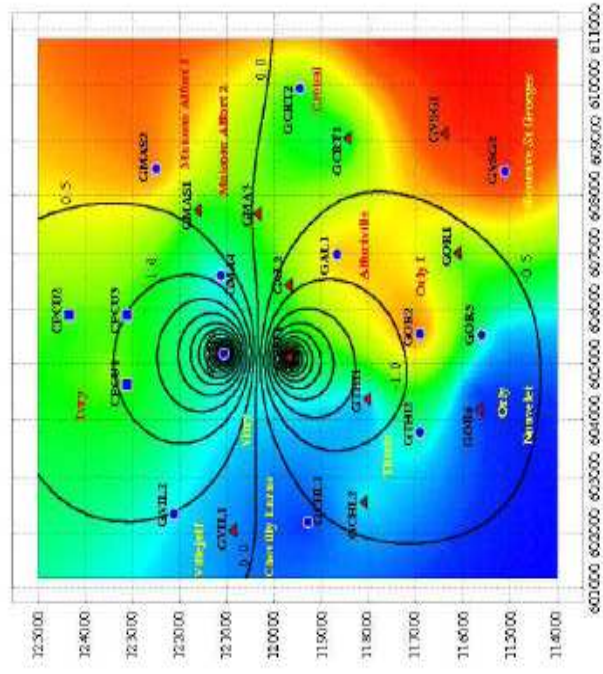
Exemple-type de carte
température initiale



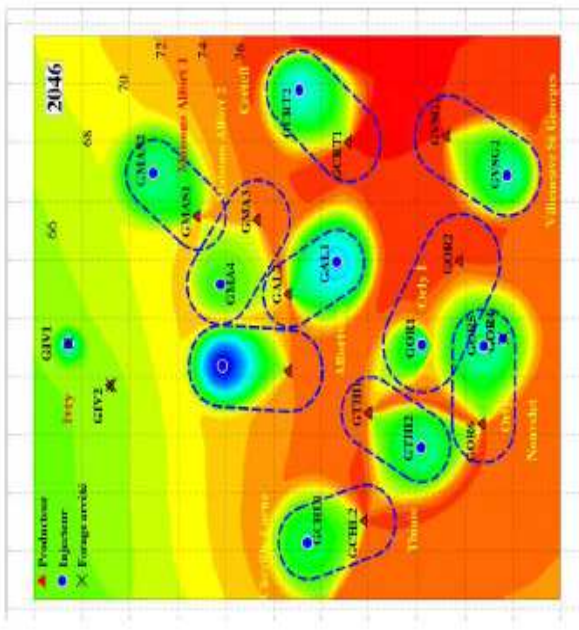
Exemple-type de carte
de transmissivité



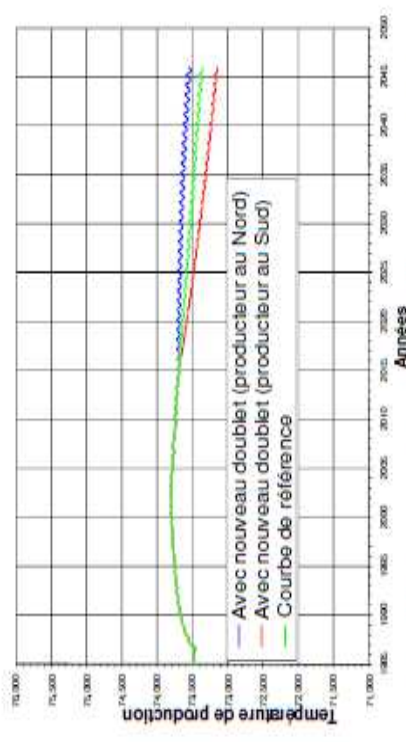
Exemple-type de carte
d'épaisseur productive



Exemple-type de carte de variations piézométriques



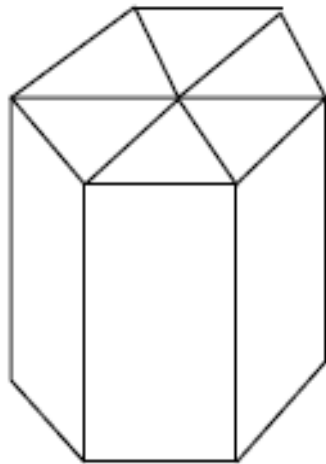
Exemple-type de champ de température



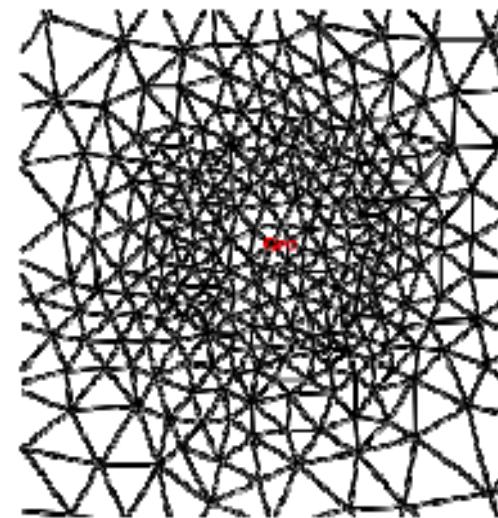
Exemple-type de températures de production

Come lavora il modello idrogeologico-numerico?

Scelta **equazioni differenziali** per il **modello numerico di trasporto ottimale** (il codice di calcolo attuale risale ancora a fine anni '70, è scritto ancora oggi in Fortran 77 a 12.000 linee, adattato nel 1989-90 a sistemi tipo windows su work-station in UNIX e macchine tipo SUN), scelta **interfacce** (FEAFLOW, TOUGH2, GED, MT3D), **discretizzazione** (elem. finiti o diff. finite), studio del **modello concettuale** (geometria reservoir, condiz. ai limiti e iniziali, calcolo analitico preliminare, scelta maglie imposte e condiz. Neumann, Dirichlet, Fourier), **calcolo numerico** con taratura e validazione dati idrogeotermici



Discretisation en éléments prismatiques



Maillage horizontal autour d'un forage

$$\text{div} \left(\overline{\overline{D}} \text{grad} C \right) - \text{div} (\vec{v} C) = \varepsilon_c \frac{\partial c}{\partial t} + (1 - \varepsilon_c) \rho_s \frac{\partial F}{\partial t}$$

CONVEZIONE

DISPERSIONE

DIFFUSIONE

1) EQ. DARCY

2) EQ. DI CONTINUITA' = CONSERVAZIONE DI MASSA E DI CALORE

3) EQ. DI STATO ISOTERMICO DEL FLUIDO

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{\sigma}^h K_{xx} dz \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{\sigma}^h K_{yy} dz \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \omega_d \frac{\partial h}{\partial t} + Q$$

NON-LINEARE in h

$$T_{ii} = \int K_{ii} dz$$

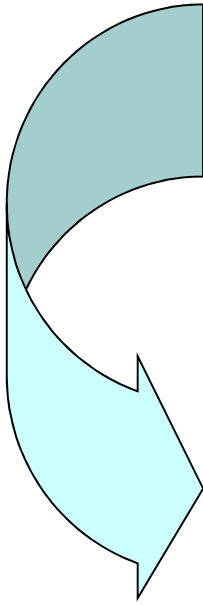
$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\omega_d}{T} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{Q}{T}$$

LINEARE in h

- h (m)
- T (m²/s)
- S, ωd

PROVE IN SITO !

Transport Convectif – Dispersif


$$\operatorname{div}\left(\overline{\overline{\vec{D} \operatorname{grad} C}}\right) - \operatorname{div}(\vec{v} C) = \varepsilon_c \frac{\partial c}{\partial t} + (1 - \varepsilon_c) \rho_s \frac{\partial F}{\partial t}$$

ove:

- | | |
|-------------------|--|
| C = | [C] en fraction mobile: mathiere où chaleur |
| F = | [C] en fraction immobile |
| D = | coeff. dispersion hydrodynamique |
| ε_c = | porosité cinématique |
| ρ_s = | masse volumique en fract. immobile |
| v = | vitesse = v/n_{eff} |
| R = | coeff. de retard |

4 – CONTO ECONOMICO e BUSINESS-PLAN

Il Conto economico: suo aggiornamento in continuo

Date:	02/12/2016
Customer:	n.d.
Geothermal site:	n.d.

LEGENDA
input data
calculation data

Assumptions on geothermal field:

A) 1 production and 1 reinjection well

B) Geothermal water temperature °C: **130**

in fractured acquifer

°C at the surface p.c., artesian acquifer (partially)

1. Geothermal Field (Capex)

No. Production wells	1 wells
Production wells depth	2500 m
No. Reinjection wells	1 wells
Reinjection wells depth	1000 m
Wells drilling cost	1000 €/m
Total investment for drilling	3.500.000 €
No. geothermal Pumps	1 pumps
geothermal Pump cost	400.000 €/pump
Total investment for pumps	400.000 €
Turboden ORC Scope	3.500.000 €
BoP + Piping + Electric + Civil	2.000.000
Total investment for surface plant	5.500.000 €
Total CAPEX	9.400.000 €

Notes

time life = 30 years
fondo-foro acquifero
time life = 30 years
reiniezione nello stesso acquifero di provenienza

only for production wells (assumption)
assumption

assumption

ORC calculation

ORC efficiency	0,11
ORC thermal input	20,5 MW
ORC T out	70 °C
ORC delta T	60
Geothermal water heat capacity	4 kJ/kg/K

Geothermal flow required	85 kg/s or l/s
ORC consumption	20% %
ORC consumption	450 kW

Geothermal pump consumption calculation

Flow per well	65 kg/s / well
Specific Consumption	4 kW/kg/s
Consumption	341 kW

2. Financing

Bank Loan (prestito bancario)	- €
Equity	9.400.000 €

0%
100%

Expected drilling Time

Month	0 month
Month	6 month
Time of Order for ORC	6 month
Delivery Time of ORC	18 month
Time of ORC start up	24 month

start drilling of 1st production well
finishing of 1st production & reinjection well and successfull circulation test
assumption: ORC is ordered soon after first 2 wells completed
from order to first start-up

ORC Calculation

3. Revenues and OPEX

Gross power Turboden ORC	2,25 MW
Net power generation	1,46 MW
Operating time	8199 h/yr
Energy Produced	11964 MWh
Remuneration (F.I.T.)	159 €/MWh
Revenues (Italian tariff electrical energy)	1.902.214 €/yr
OPEX as a % of CAPEX	2%
OPEX	188.000
discounting rate	7%

Net = Gross - (ORC + Geothermal pumps auxiliaries)
assuming total availability per year
assuming that energy = design power output x operating hours

94% i.e.: 8199,36

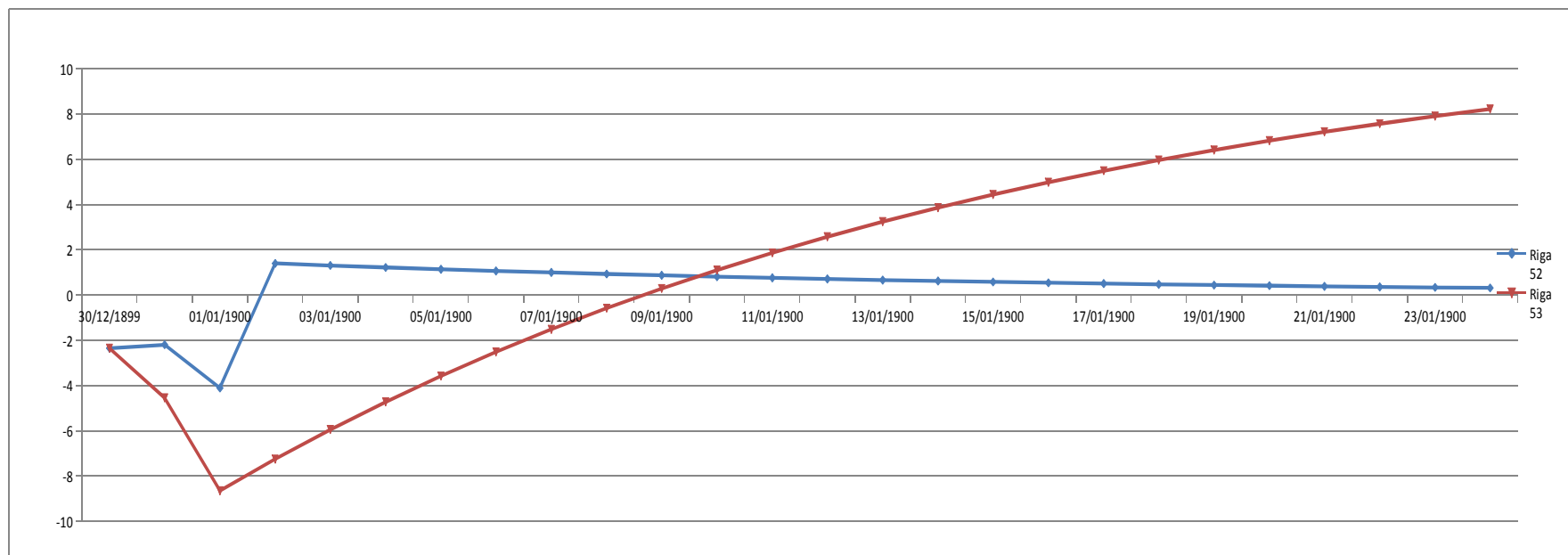
on net power: only electrical energy sold (thermic energy = 0)

assumption based on similar geo projects

175.935 OK (verifica OPEX basata su 20 \$/MWh)

II Business plan: suo aggiornamento in continuo

Year	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operating hours % on nominal		0%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Cash In	0,0	0,0	0,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
Expected Investment distribution	25%	25%	50%								
Cash Out	-2,4	-2,4	-4,7	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Cash In - Cash out	-2,4	-2,4	-4,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
DCF (vedi grafico)	-2,4	-2,2	-4,1	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9
NPV (vedi grafico)	-2,4	-4,5	-8,7	-7,3	-5,9	-4,7	-3,6	-2,5	-1,5	-0,6	0,3
Month	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0,0244



4 – COONCLUSIONE

PAY BACK
VAN
IRR

GROSS PAY-BACK non attualizzato: **6,2 anni** (+/- 15% gestione, spese, imprevisti)

VAN (Valore Attuale Netto) o NPV (Net Present Value) o DCF (Discounted Cash Flow) = entrate – uscite annue, ossia **quanto resterebbe concretamente in cassa alla fine dell'anno**

IRR (Internal Rate of Return) o TIR (Tasso interno di Rendimento). E' il tasso che rende il VAN = 0 = **tasso % di resa annua del denaro (Equity) effettivamente versato nell'investimento > 12%!!!**

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

